

UNI/PdR xx:2023	Sistemi agrivoltaici: integrazione di attività agricole e impianti fotovoltaici
Sommario	La presente prassi di riferimento si propone di fornire requisiti relativi ai sistemi agrivoltaici partendo dal contesto tecnico normativo esistente in materia di impianti fotovoltaici e attività agricole, con particolare attenzione agli aspetti specifici correlati all'ambito di applicazione degli impianti agrivoltaici e sviluppo della tecnologia associati a tali impianti e relativi progetti. Si definiscono inoltre i requisiti di base per la redazione e presentazione di progetti inerenti impianti agrivoltaici e analisi multicriteria per la valutazione dei suddetti progetti.
Data	2023-03-09

Avvertenza

Il presente documento è un progetto di Prassi di Riferimento (UNI/PdR) sottoposta alla fase di consultazione, da utilizzare solo ed esclusivamente per fini informativi e per la formulazione di commenti.

Il processo di elaborazione delle Prassi di Riferimento prevede che i progetti vengano sottoposti alla consultazione sul sito web UNI per raccogliere i commenti del mercato: la UNI/PdR definitiva potrebbe quindi presentare differenze rispetto al documento messo in consultazione.

Questo documento perde qualsiasi valore al termine della consultazione, cioè il: **12 aprile 2023**

UNI non è responsabile delle conseguenze che possono derivare dall'uso improprio del testo dei progetti di Prassi di Riferimento in consultazione.

PREMESSA

La presente prassi di riferimento UNI/PdR xx:2023 non è una norma nazionale, ma è un documento pubblicato da UNI, come previsto dal Regolamento UE n.1025/2012, che raccoglie prescrizioni relative a prassi condivise all'interno del seguente soggetto firmatario di un accordo di collaborazione con UNI:

ENEA

*Lungotevere Grande Ammiraglio Thaon di Revel, 76
00196 Roma (RM)*

Università Cattolica del Sacro Cuore

*L.go A. Gemelli, 1
20123 Milano (MI)*

Rem Tec srl

*Via Cremona, 62/O
46041 Asola (MN)*

La presente prassi di riferimento è stata elaborata dal Tavolo “Sistemi agrivoltaici: integrazione di attività agricole e impianti fotovoltaici” condotto da UNI, costituito dai seguenti esperti:

xxxxxx

xxxxxx

xxxxxx

La presente prassi di riferimento è stata ratificata dal Presidente dell'UNI il xx xxxx 2023.

Le prassi di riferimento, adottate esclusivamente in ambito nazionale, rientrano fra i “prodotti della normazione europea”, come previsti dal Regolamento UE n.1025/2012, e sono documenti che introducono prescrizioni tecniche, elaborati sulla base di un rapido processo ristretto ai soli autori, sotto la conduzione operativa di UNI. Le prassi di riferimento sono disponibili per un periodo non superiore a 5 anni, tempo massimo dalla loro pubblicazione entro il quale possono essere trasformate in un documento normativo (UNI, UNI/TS, UNI/TR) oppure devono essere ritirate.

Chiunque ritenesse, a seguito dell'applicazione della presente prassi di riferimento, di poter fornire suggerimenti per un suo miglioramento è pregato di inviare i propri contributi all'UNI, Ente Italiano di Normazione, che li terrà in considerazione.

SOMMARIO

1	SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE	4
2	RIFERIMENTI NORMATIVI E LEGISLATIVI.....	4
3	TERMINI E DEFINIZIONI	4
4	PRINCIPIO	6
5	CLASSIFICAZIONE DELLE ATTIVITÀ AGRICOLE.....	6
5.1	COLTURE AGRICOLE NON PERMANENTI	6
5.2	COLTURE AGRICOLE PERMANENTI	6
5.3	ALLEVAMENTO DI ANIMALI.....	7
5.4	ALTRE CATEGORIE	7
6	CLASSIFICAZIONE DEGLI IMPIANTI AGRIVOLTAICI	7
6.1	IMPIANTI AGRIVOLTAICI ELEVATI (TIPO 1).....	8
6.2	IMPIANTI AGRIVOLTAICI INTERFILARI (TIPO 2).....	9
6.3	IMPIANTI AGRIVOLTAICI VERTICALI (TIPO 3).....	9
6.4	TECNOLOGIA DELLE CELLE, TIPOLOGIA DEI MODULI E DEI COMPONENTI DELL'IMPIANTO	9
7	REQUISITI DEI SISTEMI AGRIVOLTAICI PER L'INTEGRAZIONE CON L'AGRICOLTURA	14
7.1	DISPONIBILITÀ DI IRRAGGIAMENTO.....	14
7.2	TIPOLOGIA E MATERIALI DELLE STRUTTURE	15
7.3	TIPOLOGIA E MATERIALE DELLE FONDAZIONI	15
7.4	CONSIDERAZIONI SULLE ATTIVITÀ DI INSTALLAZIONE.....	15
7.5	CONSIDERAZIONI SULLE ATTIVITÀ DI MANUTENZIONE.....	15
7.6	FERTILITÀ DEL SUOLO	16
8	REQUISITI TECNICI DEI SISTEMI AGRIVOLTAICI.....	17
8.1	SUPERFICIE MINIMA COLTIVATA	18
8.2	PERCENTUALE DI SUPERFICIE COMPLESSIVA COPERTA DAI MODULI (LAOR)	19
8.3	RESA AGRICOLA.....	19

8.4	RENDIMENTO ENERGETICO / PRODUCIBILITÀ ELETTRICA MINIMA.....	21
8.5	LAND EQUIVALENT RATIO	22
9	INTEGRAZIONE DELLE ATTIVITÀ AGRICOLE CON LA GESTIONE DEGLI IMPIANTI AGRIVOLTAICI	23
10	INTEGRAZIONE DEI SISTEMI AGRIVOLTAICI CON IL PAESAGGIO	25
11	RICADUTE SUL TERRITORIO E SULLA COMUNITÀ.....	26
12	TIPOLOGIE DI SOGGETTO RESPONSABILE DEI SISTEMI AGRIVOLTAICI.....	27
13	MONITORAGGIO DEI SISTEMI AGRIVOLTAICI	28
13.1	SISTEMA DI MONITORAGGIO FOTOVOLTAICO (MFV)	28
13.2	SISTEMA DI PRODUZIONE AGRICOLA (MPA)	29
13.3	RACCOMANDAZIONI SUL MONITORAGGIO	30
	APPENDICE A – Riferimenti legislativi e normativi per i requisiti di sicurezza di impianti agrivoltaici..	32
	APPENDICE B - Area di monitoraggio delle colture: resa e fertilità del suolo.....	34
	APPENDICE C - Approfondimento sull'integrazione dei sistemi agrivoltaici con il paesaggio.....	36
	APPENDICE D - Ricadute sul territorio e sulla comunità.....	39
	BIBLIOGRAFIA.....	41

1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

La presente prassi di riferimento si propone di fornire requisiti relativi ai sistemi agrivoltaici partendo dal contesto tecnico normativo esistente in materia di impianti fotovoltaici e attività agricole, con particolare attenzione agli aspetti specifici correlati all'ambito di applicazione degli impianti agrivoltaici e sviluppo della tecnologia associati a tali impianti e relativi progetti. Si definiscono inoltre i requisiti di base per la redazione e presentazione di progetti inerenti impianti agrivoltaici e analisi multicriteria per la valutazione dei suddetti progetti.

2 RIFERIMENTI NORMATIVI E LEGISLATIVI

La presente prassi di riferimento rimanda, mediante riferimenti datati e non, a disposizioni contenute in altre pubblicazioni. Tali riferimenti normativi e legislativi sono citati nei punti appropriati del testo e sono di seguito elencati. Per quanto riguarda i riferimenti datati, successive modifiche o revisioni apportate a dette pubblicazioni valgono unicamente se introdotte nel presente documento come aggiornamento o revisione. Per i riferimenti non datati vale l'ultima edizione della pubblicazione alla quale si fa riferimento.

Linee Guida in materia di impianti agrivoltaici del Ministero della Transizione Ecologica (MiTE)¹, 27 giugno 2022

Linee Guida per lo sviluppo dell'Agricoltura di Precisione in Italia del Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (MIPAAF)², settembre 2017

Decreto-legge 31 maggio 2021, n. 77, Governance del Piano nazionale di ripresa e resilienza e prime misure di rafforzamento delle strutture amministrative e di accelerazione e snellimento delle procedure

Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018, Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)

CEI EN IEC 61724-1 Photovoltaic system performance Part 1: Monitoring

CEI EN 62446 Sistemi fotovoltaici (FV) - Prescrizioni per le prove, la documentazione e la manutenzione. Parte 1: Sistemi fotovoltaici collegati alla rete elettrica - Documentazione, prove di accettazione e verifica ispettiva

CEI PAS 82-93 Impianti agrivoltaici

DIN SPEC 91434 Agri-photovoltaic systems – Requirements for primary agricultural use

AFNOR Référentiel de labélisation des projets de classe A sur culture (Label Projet Agrivoltaïque), Version 1.1, Décembre 2021

Linee guida per la progettazione e la costruzione di impianti di produzione di energia solare agricola - Edizione 2021, New Energy and Industrial Technology Development Organisation (NEDO)

3 TERMINI E DEFINIZIONI

Ai fini del presente documento valgono i termini e le definizioni seguenti:

¹ Attuale Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE).

² Attuale Ministero dell'Agricoltura, della Sovranità Alimentare e delle Foreste (MASAF)

- 3.1 altezza libera da terra:** Altezza misurata da terra fino al bordo inferiore del modulo fotovoltaico.
- 3.2 attività agricola:** Produzione, allevamento o coltivazione di prodotti agricoli, comprese la raccolta, la mungitura, l'allevamento e la custodia degli animali per fini agricoli.
- 3.3 colture agricole non permanenti:** Colture costituite da piante che non superano più di due stagioni agricole (es. coltivazione delle piante per la produzione di sementi).
- 3.4 colture agricole permanenti:** Colture costituite da piante che vengono coltivate per più di due annate agrarie e che, pur morendo stagionalmente, ricrescono in modo costante.

NOTA È inclusa la coltivazione di queste piante per la produzione di sementi.

- 3.5 impianto agrivoltaico:** Impianto fotovoltaico che adotta soluzioni volte a preservare la continuità delle attività di coltivazione agricola e pastorale sul sito di installazione.

[Fonte: Linee guida MiTE]

- 3.6 impianto agrivoltaico elevato:** Impianto fotovoltaico che rispetti il requisito C delle Linee Guida MiTE, e in cui sia possibile svolgere l'attività agricola anche al di sotto dei moduli FV.
- 3.7 impianto agrivoltaico interfilare:** Impianto fotovoltaico la cui struttura abbia un'altezza libera da terra inferiore rispetto a quelle definite per impianti agrivoltaici elevati.
- 3.8 impianto fotovoltaico fisso:** Impianto fotovoltaico ancorati o vincolati rigidamente ad un supporto, suolo o parti di edificio (tetti, terrazze o facciate).
- 3.9 Land Area Occupation Ratio (LAOR):** Rapporto, espresso in percentuale, tra la superficie totale di ingombro dell'impianto agrivoltaico (S_{pv}) e la superficie totale occupata dal sistema agrivoltaico (S_{tot}).
- 3.10 potenza nominale di un impianto agrivoltaico:** Potenza elettrica dell'impianto, determinata dalla somma delle singole potenze nominali di ciascun modulo fotovoltaico facente parte del medesimo impianto, misurate alle condizioni STC (Standard Test Condition) come definite dalle pertinenti norme CEI, espressa in kW.

[Fonte: Linee guida MiTE]

- 3.11 producibilità elettrica specifica di riferimento (FVstandard):** Stima dell'energia che può produrre un impianto fotovoltaico di riferimento, collocato nello stesso sito dell'impianto agrivoltaico e caratterizzato da moduli con efficienza 20% su supporti fissi orientati a sud e inclinati con un angolo pari alla latitudine meno 10 gradi, espressa in GWh/ha/anno.
- 3.12 produzione elettrica specifica di un impianto agrivoltaico (FVagri):** Produzione netta che l'impianto agrivoltaico può produrre, espressa in GWh/ha/anno.
- 3.13 resa agricola (R_a):** Rapporto tra la quantità di prodotto agricolo prodotto e la superficie agricola coltivata.

NOTA Si considera la quantità di prodotto fresco ottenuto per unità di superficie (es. piante orticole) o la quantità di sostanza secca raccolta per superficie (es. cereali).

- 3.14 sistema agrivoltaico:** Sistema che comprende l'impianto agrivoltaico e l'attività agricola.

- 3.15 superficie complessiva dei moduli fotovoltaici (S_{pv}):** Somma delle superfici individuate dal profilo esterno di massimo ingombro di tutti i moduli fotovoltaici costituenti l'impianto.
- 3.16 superficie di un sistema agrivoltaico (S_{tot}):** Area racchiusa tra il perimetro rappresentato da tutte le componenti della struttura dell'impianto agrivoltaico, inteso come proiezione al suolo dei suoi componenti. Comprende la superficie utilizzata per coltura e/o zootecnia e la superficie totale su cui insiste l'impianto agrivoltaico.
- 3.17 superficie utilizzata per scopi agricoli ($S_{agricola}$) del sistema agrivoltaico:** Area all'interno della Superficie del sistema agrivoltaico che viene utilizzata per attività agricole senza limitazioni tecniche dopo la realizzazione del sistema agrivoltaico.

4 PRINCIPIO

La prassi di riferimento è strutturata in modo da definire una panoramica delle tipologie e applicazioni di sistemi agrivoltaici, andando in particolare a coprire i seguenti argomenti:

- classificazione dei sistemi agrivoltaici;
- requisiti dei sistemi agrivoltaici;
- best practice di sistemi agrivoltaici.

L'obiettivo è assicurarsi che i sistemi agrivoltaici rispettino il principio di integrazione reciproca tra agricoltura e tecnologia fotovoltaica, rispettando la normativa vigente in materia.

La prassi di riferimento è completata da:

- Appendice A: riferimenti legislativi e normativi per i requisiti di sicurezza di impianti Agrivoltaici;
- Appendice B: approfondimento su criteri di resa e fertilità del suolo;
- Appendice C: approfondimento sull'integrazione dei sistemi agrivoltaici con il paesaggio;
- Appendice D: ricadute sul territorio e sulla comunità.

5 CLASSIFICAZIONE DELLE ATTIVITÀ AGRICOLE

La classificazione delle attività agricole qui presente fa riferimento alla classificazione ATECO per le attività produttive che utilizzano le risorse di origine vegetale e animale incluse nella sezione A: agricoltura, silvicoltura e pesca. La divisione per la classificazione delle attività agricole a cui si fa riferimento in questo documento viene indicata con il numero 01.

5.1 COLTURE AGRICOLE NON PERMANENTI

Le colture agricole non permanenti comprendono:

- 01.11 Coltivazione di cereali (escluso il riso), legumi da granella e semi oleosi
- 01.12 Coltivazione di riso
- 01.13 Coltivazione di ortaggi e meloni, radici e tuberi
- 01.14 Coltivazione di canna da zucchero
- 01.15 Coltivazione di tabacco
- 01.16 Coltivazione di piante tessili
- 01.19 Floricoltura e coltivazione di altre colture non permanenti

5.2 COLTURE AGRICOLE PERMANENTI

Le colture agricole permanenti comprendono:

- 01.21 Coltivazione di uva
- 01.22 Coltivazione di frutta di origine tropicale e subtropicale
- 01.23 Coltivazione di agrumi

- 01.24 Coltivazioni di pomacee e frutta a nocciolo
- 01.25 Coltivazione di altri alberi da frutta, frutti di bosco e in guscio
- 01.26 Coltivazione di frutti oleosi
- 01.27 Coltivazione di piante per la produzione di bevande
- 01.28 Coltivazione di spezie, piante aromatiche e farmaceutiche
- 01.29 Coltivazione di altre colture permanenti (inclusi alberi di natale)

5.3 ALLEVAMENTO DI ANIMALI

La categoria allevamento di animali include l'allevamento e la riproduzione di tutti gli animali (esclusa la fauna acquatica), ovvero:

- 01.41 Allevamento di bovini da latte
- 01.42 Allevamento di altri bovini e di bufalini
- 01.43 Allevamento di cavalli e altri equini
- 01.44 Allevamento di cammelli e camelidi
- 01.45 Allevamento di ovini e caprini
- 01.46 Allevamento di suini
- 01.47 Allevamento di pollame
- 01.48 allevamento di altri animali

5.4 ALTRE CATEGORIE

Altre categorie di attività agricole della classificazione ATECO includono coltivazioni agricole associate all'allevamento di animali (01.5), attività di supporto all'agricoltura e successive alla raccolta (01.6) (per es. lavorazioni delle sementi) e caccia (01.7). Queste categorie non hanno collegamenti con i sistemi agrivoltaici e pertanto non sono prese in considerazione per la presente prassi di riferimento.

6 CLASSIFICAZIONE DEGLI IMPIANTI AGRIVOLTAICI

Gli impianti agrivoltaici possono essere classificati in 3 macrocategorie in base alla tecnologia adottata:

- Impianti di TIPO 1: Impianti agrivoltaici elevati (fissi, ad inseguimento monoassiale, ad inseguimento biassiale)
- Impianti di TIPO 2: Impianti agrivoltaici interfilari (fissi, ad inseguimento monoassiale, ad inseguimento biassiale)
- Impianti di TIPO 3: Impianti agrivoltaici verticali

Per ciascuna macrocategoria è possibile definire delle sottocategorie in funzione dell'attività agricola svolta sul sito di riferimento:

- Sottocategoria A: colture permanenti (frutteti, vigneti)
- Sottocategoria B: colture annuali e pluriennali (cerealicole, orticole, foraggere, prato)
- Sottocategoria C: zootecnia (pascolo di bovini, ovini, avicoli).

Un requisito fondamentale degli impianti agrivoltaici è che il terreno su cui insiste l'impianto fotovoltaico venga usato per svolgere attività agricole.

Gli impianti agrivoltaici elevati (TIPO 1) permettono lo svolgimento delle pratiche agricole al di sotto dei moduli FV e della struttura di sostegno dei moduli. L'altezza dell'impianto è quindi definita in funzione dell'attività svolta e dei macchinari o animali che devono transitare sotto l'impianto. Pertanto, gli impianti agrivoltaici di TIPO 1 sono quelli considerati maggiormente integrati con l'agricoltura e ad elevato valore aggiunto.

Gli impianti agrivoltaici interfilari (TIPO 2) invece non permettono lo svolgimento dell'attività agricola sotto i moduli FV, ma solamente tra le file dei moduli e pertanto costituiscono sistemi con ridotto grado di integrazione con l'agricoltura.

Nei punti successivi sono dettagliate le caratteristiche di ciascun impianto.

6.1 IMPIANTI AGRIVOLTAICI ELEVATI (TIPO 1)

Gli impianti agrivoltaici elevati permettono lo svolgimento dell'attività agricola al di sotto dei moduli. Pertanto, considerando il livello possibile di integrazione di questi sistemi, essi sono compatibili con le sottocategorie A, B e C, a patto di rispettare i requisiti indicati di seguito.

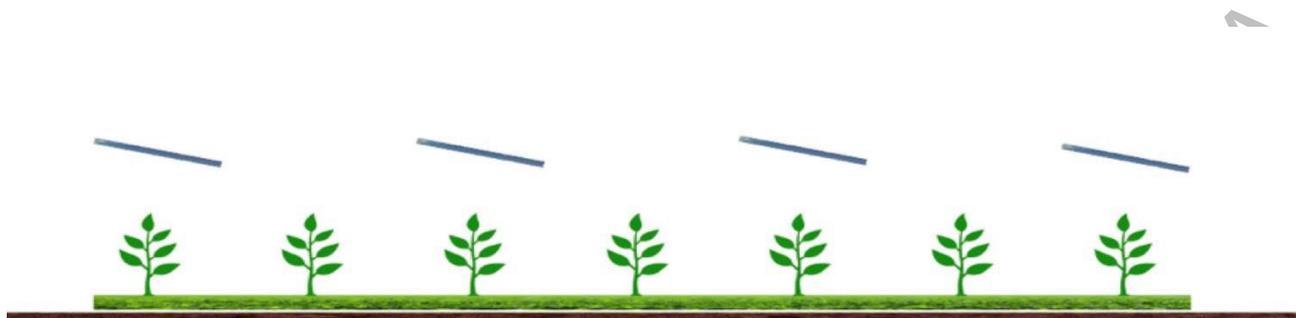


Fig. 1 Sistema agrivoltaico elevato (TIPO 1)³

6.1.1 Altezza libera da terra

L'altezza libera da terra è definita in modo differente a seconda che l'impianto sia fisso o ad inseguimento.

Per gli impianti fissi, la cui inclinazione dei moduli FV non può essere modificata durante la giornata o stagione, l'altezza libera da terra è l'altezza misurata da terra fino al bordo inferiore del modulo fotovoltaico. In caso di moduli installati su strutture ad inseguimento, l'altezza è misurata con i moduli collocati alla massima inclinazione tecnicamente raggiungibile. Nel caso in cui i moduli abbiano altezza variabile si considera la media delle altezze da terra.

Per la definizione di impianto agrivoltaico elevato, l'altezza libera da terra viene stabilita in fase di progettazione in funzione dell'attività agricola svolta e in ogni caso dovrà essere maggiore dei seguenti valori:

- 1) Per le sottocategorie A e B: 2.1 m per permettere lo svolgimento delle più comuni pratiche agricole, nonché lasciare flessibilità alla scelta della tipologia di attività agricola che può anche cambiare nel corso della vita utile dell'impianto;
- 2) Per la sottocategoria C: 1.3 m per permettere il passaggio degli animali, nonché lasciare flessibilità alla scelta della tipologia di pascolo attività agricola che può anche cambiare nel corso della vita utile dell'impianto.

Nella fase di progettazione dell'impianto agrivoltaico, si deve tenere conto dell'altezza libera da terra in modo che i lavoratori o le macchine agricole possano lavorare senza pericolo e garantire che le macchine agricole possano circolare al di sotto dei moduli fotovoltaici.

Si precisa inoltre che l'altezza libera da terra da prevedere in fase di progettazione dell'impianto deve essere commisurata alla coltura o tipologia di allevamento esistente sul terreno. A titolo esemplificativo, è chiaro come su un terreno coltivato a mais, i 2.10 m da terra non risulterebbero sufficienti per permettere la crescita della coltura.

Ne consegue che impianti agrivoltaici che hanno una maggiore altezza libera da terra possiedono un grado di integrazione e flessibilità maggiore con l'agricoltura. Un'altezza libera da terra superiore da quella minima

³ Fonte: Linee Guida MiTE

indicata dalle Linee Guida MiTE è preferibile e assegna al sistema agrivoltaico un livello di integrazione maggiore.

6.2 IMPIANTI AGRIVOLTAICI INTERFILARI (TIPO 2)

A differenza degli impianti agrivoltaici elevati, gli impianti agrivoltaici interfilari permettono lo svolgimento dell'attività agricola solo tra le file dei moduli fotovoltaici.

In questo caso si tratta quindi di uso combinato del suolo e non di uso integrato poiché non c'è una vera e propria condivisione degli spazi e sinergia tra impianto e coltura.



Fig. 2 Sistema agrivoltaico interfilare (TIPO 2)⁴.

6.3 IMPIANTI AGRIVOLTAICI VERTICALI (TIPO 3)

L'altezza minima dei moduli da terra non incide significativamente sulle possibilità di coltivazione (se non per l'ombreggiamento in determinate ore del giorno), ma può influenzare il grado di connessione dell'area, e cioè il possibile passaggio degli animali, con implicazioni sull'uso dell'area per attività legate alla zootecnia. Per contro, l'integrazione tra l'impianto agrivoltaico e la coltura si può esplicitare nella protezione della coltura compiuta dai moduli fotovoltaici che operano come barriere frangivento.



Fig. 3 Sistema agrivoltaico verticale (TIPO 3)⁵.

6.4 TECNOLOGIA DELLE CELLE, TIPOLOGIA DEI MODULI E DEI COMPONENTI DELL'IMPIANTO

6.4.1 Tecnologie delle celle

Le tecnologie di celle utilizzabili negli impianti agrivoltaici e le loro architetture non sono generalmente diverse da quelle già disponibili commercialmente nel mercato fotovoltaico tradizionale, sia su terreno sia su edificio, a meno che siano espressamente richieste particolari caratteristiche di trasparenza della luce o di distribuzione spettrale per una migliore e più ottimale gestione delle attività agricole o pastorali ivi condotte, anche sulla base di una relazione agronomica, che portino alla scelta di celle che consentano tali funzioni. Alcune tecnologie di

⁴ Fonte: Linee Guida MiTE

⁵ Fonte: Linee Guida MiTE

celle inoltre, che sono più sensibili alle componenti diffuse della radiazione solare, circostanza che ha reso favorevole l'impiego di moduli bifacciali, possono candidarsi come scelte di sicuro interesse per gli impianti agrivoltaici.

6.4.1.1 Celle al silicio cristallino

Le celle realizzate in silicio mono, poli, micro o quasi-mono cristallino sono al momento le più commercialmente diffuse, con circa il 94-95% di capacità annuale installata. Oltre ai moduli tradizionali sono da diversi anni disponibili celle con efficienza oltre il 20 % che con architetture innovative tipo TOPCon, PERC, PERT, HJT o IBC possono conseguire prestazioni anche superiori, come osservabile nelle figure sotto riportate.

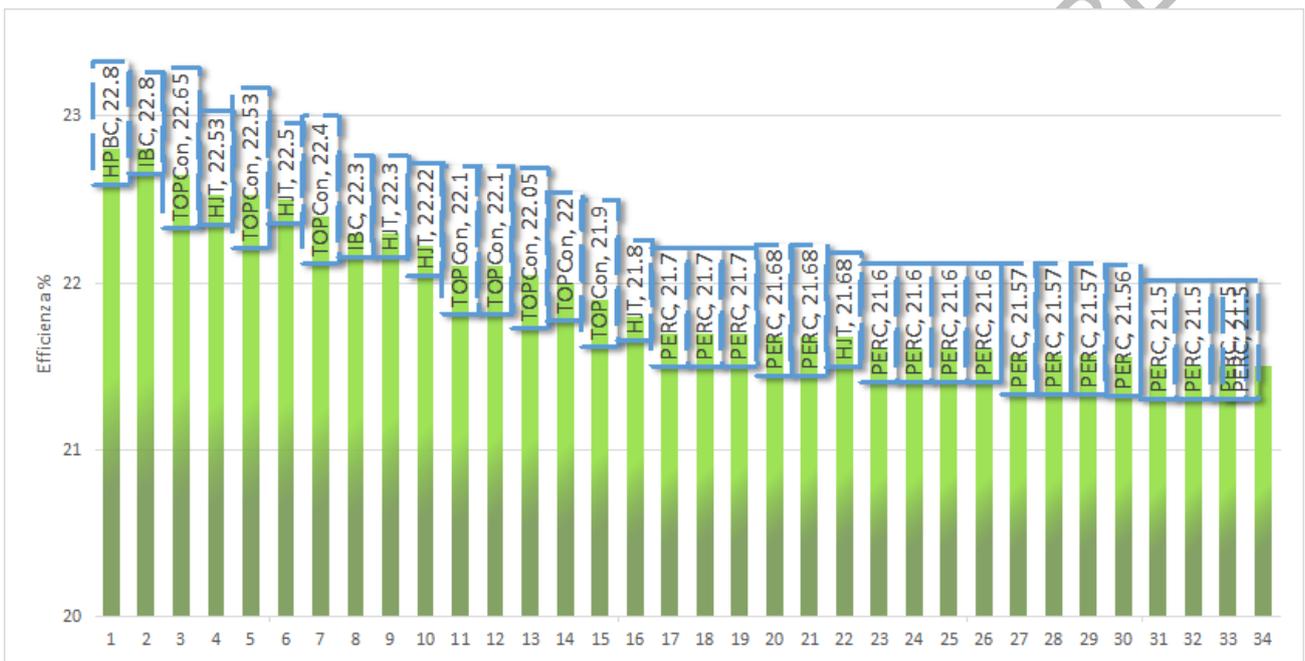
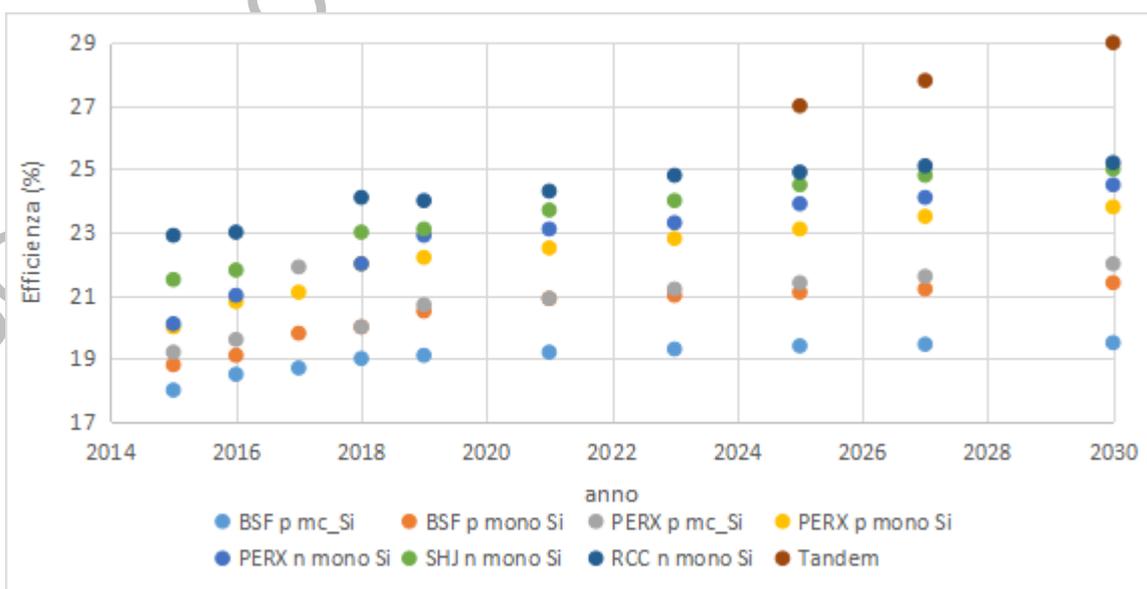


Fig. 4 Efficienza moduli fotovoltaici disponibili sul mercato⁶



⁶ Fonte ENEA

Fig. 5 Trend di efficienza moduli fotovoltaici per tipologia⁷

Le celle PERC (passivated emitter rear contact) sono ora piuttosto comuni rispetto a qualche anno fa e l'architettura TOPCon (Tunnel, oxide passivated contact) sta emergendo sempre con maggiori efficienze; questa si basa sull'applicazione di un sottilissimo strato di SiO₂ con funzione di strato di passivazione superficiale che riduce le perdite per ricombinazione. Altre tecniche per aumentare le prestazioni prevedono l'impiego di celle tagliate a metà o a terzi e con una griglia frontale di raccolta che presenta un maggior numero di contatti (finger), per ridurre le perdite essenzialmente di tipo ohmiche e con sezioni dei contatti e tecnologie avanzate di contattatura per ridurre quelle di riflessione.

Le celle in silicio cristallino possono essere diversamente drogate e quindi possono essere di tipo P, con lo strato assorbente drogato con boro, simbolo B, con una maggiore densità di lacune, portatori di carica maggioritari di tipo positivo, o di tipo N con lo strato assorbente drogato con fosforo, simbolo P, con una maggiore densità degli elettroni liberi, portatori di carica maggioritari di tipo negativo. Nonostante le celle di tipo p siano al momento più diffuse, l'industria fotovoltaica si sta concentrando maggiormente sulle celle di tipo n in quanto quest'ultime permettono di ottenere efficienze più elevate e sono più stabili nei confronti di alcuni fenomeni degenerativi come il LID (Light Induced Degradation).

Le celle al Si hanno subito una profonda trasformazione nella dimensione della superficie che è andata aumentando passando dalle celle di dimensione tipica 5", pari a circa 125 mm, fino a celle di area maggiore, con dimensioni nominali lineari di 210 mm.

Un altro aspetto innovativo delle celle al Si è dato dalle interconnessioni elettriche delle celle. In passato le celle avevano principalmente 2 contatti chiaramente visibili sulla parte frontale (celle a 2 BB bus bar). Con il tempo il numero di contatti presenti sulla parte frontale e posteriore delle celle è andato via via aumentando nell'ottica di diminuire le perdite resistive di interconnessione. Con il tempo si è passati dalle celle con 3 contatti sulla parte frontale e posteriore delle celle (celle a 3 BB) a celle con 4 o 5 (celle a 4BB o celle a 5BB) fino a sviluppare celle con 12 BB e celle interconnesse con "multi wire". Esistono infine celle fotovoltaiche in silicio cristallino dove i contatti + e - sono entrambi posti nella parte posteriore della cella per evitare il fenomeno dell'autoombreggiamento del contatto frontale. Tali celle sono chiamate celle "back contact". Sono state sviluppate diverse tecnologie di celle fotovoltaiche "back contact" come le celle IBC - Interdigitated back contact solar cells e le EWT - Emitter wrap through.

Un particolare tipo di celle al Si sono le celle ad etero-giunzione (HJT) che combinano wafer di silicio cristallino n-type con uno strato di silicio amorfo.

6.4.1.2 Celle a film sottile

Se le celle realizzate in silicio cristallino si posizionano a circa il 94-95% di capacità annuale installata, il restante 5-6 % della capacità installata è rappresentato da questa tecnologia con il 4 -5 % di Tellururo di Cadmio CdTe in posizione dominante ed il resto, meno dell 1%, con quelle basate su calcogenuri come il CIS ed il CIGS. Il silicio amorfo ha perso alquanto terreno e trova impiego essenzialmente nelle strutture ad eterogiunzioni. Normalmente i moduli in CdTe hanno dei coefficienti di temperatura più bassi rispetto ai moduli c-Si e quindi hanno un miglior comportamento energetico in ambienti ad alte temperature, ma sono metastabili. I moduli

⁷ Fonte ENEA

realizzati in silicio amorfo hanno comportamento energetico migliore rispetto ai moduli cristallini in condizioni di basso irraggiamento e di luce diffusa, con problemi però di stabilità stagionale. Il CIS o CIGS, Cu(In,Ga)(S,Se)_2 sono realizzati a base di seleniuro di rame e indio gallio. Poiché il materiale ha un elevato coefficiente di assorbimento e assorbe fortemente la luce solare, è necessaria una pellicola molto più sottile rispetto ad altri materiali semiconduttori.

6.4.1.3 Celle innovative e sperimentali

Si riscontrano alcuni esempi di applicazioni di celle innovative nelle attività agrivoltaiche quali le celle organiche utilizzate per la copertura di tunnel che, con la loro semitrasparenza, consentono il controllo del flusso di luce e quindi di calore, ma permettono la trasmissione dei fotoni nella parte attiva fotosintetica dello spettro solare utili soprattutto nei territori caldi e aridi. Sono utili laddove servono applicazioni leggere, con superfici curve, anche se con effetti non omogenei per la distribuzione della radiazione solare. Sono considerate sperimentali poiché le efficienze non sono ancora ottimizzate e presentano problemi di stabilità ancora da risolvere.

6.4.2 Tipologia di moduli

I moduli fotovoltaici possono essere opachi, semitrasparenti, traslucidi e bifacciali. I moduli fotovoltaici opachi sono realizzati con materiale attivo che assorbe la componente utile dello spettro solare (parte degli UV, la finestra visibile e parte del vicino IR fino a 2000 nm per i moduli che utilizzano le celle tandem) e sono protetti con un backsheet opaco, tipicamente realizzato in polimero polivinilfluoruro o altro materiale. Anche per le applicazioni civili, per esempio nel BIPV (Building Integrated Photovoltaics) dove possono sostituire i lucernari ed è necessario prevedere un certo grado di trasparenza, questa può essere realizzata impiegando il vetro come backsheet e distanziando le celle opache in un pattern di densità ottica di tipo sartoriale, oppure utilizzando celle semitrasparenti (ottenute per esempio producendo microfori nel materiale attivo) o celle traslucide che permettano il passaggio selettivo di regioni spettrali. Per le applicazioni agrivoltaiche dove la competizione non solo del terreno ma anche della luce con le attività agricole e pastorali è ancora più pressante, l'uso di moduli fotovoltaici opachi può essere particolarmente indicata laddove la maggior altezza dei moduli sopraelevati o la maggior distanza tra gli arrays per moduli interfilarari non consenta la necessaria richiesta di luce ed in particolare della Radiazione di Attivazione della Fotosintesi (Photosynthetically Active Radiation, PAR).

I moduli bifacciali, che permettono la raccolta anche dell'energia sul lato posteriore con il loro grado di bifaccialità, possono essere una soluzione efficace per le applicazioni agrivoltaiche laddove la componente diffusa della radiazione è rilevante, la maggior distanza tra i moduli consente una maggiore riflessione (albedo) del terreno anche con coefficienti di albedo maggiori.

6.4.3 Sistemi fissi e ad inseguimento

I sistemi per la captazione dell'energia solare, non solo ai fini della conversione fotovoltaica, si dividono in sistemi fissi o ad inseguimento (tracker) a uno o due assi.

L'inclinazione dei sistemi fotovoltaici fissi, laddove la geometria del supporto non imponga dei vincoli di orientamento, ad esempio sulle facciate o sui tetti degli edifici, è generalmente rivolta verso il sud geografico, angolo di azimut di 0°, ed inclinato secondo la altitudine meno una decina di gradi.

Gli impianti fotovoltaici ad inseguimento sono realizzati con lo scopo di incrementare la produzione di energia cercando di inseguire il percorso apparente del sole mantenendo il piano dei moduli fotovoltaici sempre, con una determinata accuratezza, perpendicolare alla radiazione solare diretta, in ogni condizione dell'anno, per massimizzare la raccolta di energia. Costituisce pratica diffusa l'applicazione di un algoritmo, cosiddetto di backtracking, che prevede una diversa inclinazione dei moduli rispetto alla perpendicolare ai raggi solari in modo da evitare ombreggiamenti reciproci tra i moduli, in particolare ad inizio e fine giornata quando il sole ha un angolo di elevazione basso. Gli inseguitori possono essere monoassiali o biassiali. L'inseguitore monoassiale può avere l'asse di rotazione in direzione Est-Ovest (variazione del tilt) o, come accade più frequentemente, in direzione Nord-Sud (inseguimento azimutale). È in generale possibile ottenere incrementi di produzione del 20 - 25% rispetto a un sistema fisso, in relazione alla latitudine del sito.

L'inseguimento su due assi permette di ottenere maggiori incrementi di produzione, anche del 30%. Tuttavia, possibili problemi legati all'occupazione di spazio, alla ventosità del sito e al costo delle strutture non consentono in tutti i casi il ricorso a questa soluzione.

In definitiva, i sistemi fissi possono produrre una energia specifica (in termini di kWh/kWp) inferiore rispetto ai sistemi con uso di trackers monoassiale e specialmente biassiale, ma richiedono superfici meno estese poiché le distanze tra le file dei moduli risulta inferiore rispetto alle soluzioni con inseguimento le quali, per ovviare al rischio di ombreggiamento nel corso delle giornate, ovvero ridurre il ricorso all'algoritmo di backtracking, devono essere posizionate a distanze di rispetto maggiori.

6.4.4 Scelta dei moduli fotovoltaici

La scelta dei moduli fotovoltaici segue la più o meno complessa integrazione del fotovoltaico e del settore agricolo. Anche tenendo conto delle tipologie stabilite dalle Linee Guida MiTE nonché delle categorie e dei requisiti degli impianti agrivoltaici, esistono diversi tipi di applicazioni con diversi gradi di integrazione. È chiaro che una maggiore sinergia comporta un uso più ponderato delle diverse tecnologie dei sistemi fotovoltaici. La scelta della migliore o della più idonea tecnologia deve derivare da un'attenta analisi non solo economica ma anche tecnica del sito, delle potenzialità offerte per le attività elettriche e pastorali, dalla loro integrazione e dalle scelte tecnologiche morfologiche e strutturali del sistema.

6.4.5 Scelta dei componenti del BoS

Gli altri componenti del Balance of System (BoS) sono:

1. Cavi
2. Inverter
3. Batterie/accumulatori
4. Quadri
5. Cabine
6. Ottimizzatori
7. Trasformatori.

Allo stato dell'arte attuale non si evidenziano particolari indicazioni o prescrizioni tecniche per i componenti del BoS che siano specifiche o ottimizzate per le applicazioni agrivoltaiche ed i cataloghi dei maggiori produttori non contemplano allo stato attuale prodotti destinati a queste applicazioni. Il posizionamento dei componenti del BoS deve essere tale per cui essi non interferiscano con le pratiche agricole. Questo si applica in particolare al posizionamento di cassette/inverter di stringa e cabinati.

7 REQUISITI DEI SISTEMI AGRIVOLTAICI PER L'INTEGRAZIONE CON L'AGRICOLTURA

7.1 DISPONIBILITÀ DI IRRAGGIAMENTO

La disponibilità e l'omogeneità dell'irraggiamento a terra devono essere prese in considerazione in tutte le fasi di progettazione dell'impianto e verificate secondo la proposta colturale agricola, al fine di garantire un livello di irraggiamento sufficiente per la crescita delle colture. Una questione fondamentale legata all'implementazione dei sistemi agrivoltaici è l'impatto dei pannelli fotovoltaici sulla produttività delle colture. Le strutture di un impianto agrivoltaico possono influenzare le condizioni micro-meteorologiche del campo, tra queste, i pannelli causano un ombreggiamento che riduce il livello di radiazione solare disponibile per le colture. La radiazione intercettata delle piante è il principale motore della crescita e dello sviluppo delle colture; tuttavia, solo una frazione della radiazione viene effettivamente assorbita dalle piante durante la fotosintesi. L'idoneità delle specie vegetali alla coltivazione in agrivoltaico può essere basata sulle loro curve di risposta alla luce al fine di descrivere come il tasso di fotosintesi varia in funzione della luce.

In particolare, le curve di risposta alla luce della CO_2 sono caratterizzate da due parametri significativi:

- a) il punto in cui l'attività fotosintetica della pianta eguaglia la respirazione, definito come Punto di Compensazione della Luce (LCP); e
- b) il Punto di Saturazione della Luce (LSP) in cui il tasso fotosintetico raggiunge il massimo, oltre il quale ulteriori incrementi di luce non aumentano l'assimilazione.

In generale, le colture sensibili all'ombra necessitano di un'intensità media giornaliera della Radiazione di Attivazione della Fotosintesi (PAR) superiore a LCP per ottenere una resa commerciabile. In letteratura, la riduzione relativa della resa osservata in varie condizioni sperimentali di agrivoltaico è stata riportata per diverse colture. Nella maggior parte dei casi, con una riduzione dell'intensità della radiazione tra il 20% e il 40%, la riduzione della resa è stata tra il 20% e il 25%. Questi dati evidenziano una forte variazione nella risposta all'ombreggiamento tra le specie di colture.

La verifica deve tenere conto di tutte le parti dei moduli fotovoltaici e della struttura portante che influiscono in modo significativo sulla disponibilità di luce.

Ai fini del calcolo della superficie ombreggiante, le strutture dell'impianto sono da considerarsi elementi completamente ombreggianti, mentre i materiali di vetratura e incapsulamento tra le celle fotovoltaiche possono essere definiti come uno spazio libero da celle con una trasmittanza del 100%.

L'allineamento e le distanze tra le file dei moduli non sono soggetti a particolari limitazioni e/o requisiti e sono lasciati alla decisione del proponente, sempre nel rispetto dei requisiti tecnici di cui al punto 8. Tuttavia, questi devono essere pianificati e allineati in base alla disponibilità e all'omogeneità della luce, nel rispetto dei requisiti tecnici minimi indicati al punto 8.

Le distanze devono essere scelte in modo tale che gli effetti di sinergia tecnico-ecologica ottenuti attraverso l'ombreggiatura e l'omogeneità della luce siano il più elevati possibile e si evitino effetti negativi sulla crescita delle piante.

7.2 TIPOLOGIA E MATERIALI DELLE STRUTTURE

Indipendentemente dalla tipologia di impianto agrivoltaico (TIPO 1, 2 o 3) possono essere utilizzate diverse tecniche costruttive e materiali.

Le strutture portanti dell'impianto agrivoltaico devono essere progettate secondo il concetto di sicurezza probabilistica degli Eurocodici, come recepiti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) definite nel Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018.

Per quanto riguarda i moduli fotovoltaici, varie tecnologie possono essere utilizzate nei sistemi agrivoltaici. Tuttavia, la pianificazione della tecnologia dei moduli, gli spazi vuoti delle celle e i materiali di incapsulamento, nonché l'orientamento dei moduli, devono essere adattati alla disponibilità di luce e quindi all'uso agricolo del terreno. È consigliato posizionare i moduli in modo uniforme sul terreno agricolo per garantire la massima omogeneità di irraggiamento.

7.3 TIPOLOGIA E MATERIALE DELLE FONDAZIONI

È preferibile adottare sistemi di fondazione che permettano di evitare l'utilizzo di calcestruzzo in opera, quali ad esempio fondazioni a vite in acciaio o pali in calcestruzzo prefabbricato. Questo tipo di fondazioni rappresenta una soluzione reversibile che garantisce lo smaltimento a fine vita con minimo impatto sul terreno. Si raccomanda di evitare la presenza di cavidotti interrati all'interno del perimetro dell'impianto agrivoltaico, compatibilmente con le caratteristiche tecniche dell'impianto stesso (vedere punto 7.6 della PAS CEI 82-93).

7.4 CONSIDERAZIONI SULLE ATTIVITÀ DI INSTALLAZIONE

Per garantire che l'uso agricolo principale del terreno rimanga a lungo termine, durante l'installazione dell'impianto agrivoltaico devono essere osservate particolari precauzioni.

Le attività per l'installazione dell'impianto agrivoltaico devono essere definite e svolte nell'ottica di minimizzare l'impatto sul terreno in termini di movimentazione del suolo, compattamento, ostacolo alle attività agricole. Di conseguenza è consigliabile utilizzare mezzi leggeri per minimizzare il compattamento del suolo e programmare le attività di installazione in periodi in cui il terreno non viene coltivato e con terreno asciutto.

Infine, deve essere garantito che l'impianto agrivoltaico, in particolare per quanto riguarda le fondazioni e eventuali ancoraggi, sia idoneo ad uno smantellamento che permetta di mantenere l'originaria agibilità del terreno al termine della vita utile dell'impianto.

Se la struttura del suolo dovesse deteriorarsi durante la costruzione e/o lo smantellamento dell'impianto, sarà opportuno successivamente adottare misure adeguate per ripristinare la struttura originaria dello stesso.

7.5 CONSIDERAZIONI SULLE ATTIVITÀ DI MANUTENZIONE

Particolare attenzione deve essere prestata durante la manutenzione degli impianti agrivoltaici, poiché durante l'operatività dell'impianto possono essere presenti persone non qualificate che lavorano nell'area. Inoltre, l'uso agricolo del suolo aumenta il rischio del verificarsi di danni alla struttura e accumulo di sporco sui moduli fotovoltaici.

Per le norme relative alla manutenzione degli impianti agrivoltaici, si consiglia di fare riferimento alla norma CEI EN 62446.

Durante eventi meteorologici estremi, con formazione di ghiaccio, e in presenza di carichi estremi di vento e neve, per motivi di sicurezza non è consigliabile eseguire lavori di manutenzione in quota nell'ambito del sistema.

L'impianto agrivoltaico o i moduli fotovoltaici devono essere puliti periodicamente, se la presenza di sporco è tale da impattare sulla producibilità elettrica del sistema, in modo da ridurre al minimo le perdite di resa. La coltivazione agricola e l'applicazione di pesticidi possono aumentare l'accumulo di sporco sui moduli, motivo per cui si raccomanda un controllo regolare dello stato di pulizia degli stessi. Durante le operazioni di lavaggio dei moduli è da evitare l'utilizzo di detergenti.

7.6 FERTILITÀ DEL SUOLO

Secondo quanto riportato dalla certificazione Afnor per i sistemi agrivoltaici, i risultati di un progetto agrivoltaico in termini di prestazioni agricole possono essere misurati dopo la messa in funzione dell'impianto e talvolta il tempo necessario può essere maggiore di 4 o 5 anni in funzione del tipo di attività agricola infatti, ad esempio, se si tratta di colture perenni i risultati non possono essere valutati nel breve periodo. Anche nel caso di valutazione della fertilità del suolo, questa analisi deve essere fatta nel medio lungo periodo in linea con la durata dell'impianto agrivoltaico. Quando si parla di fertilità del suolo per un sistema agrivoltaico devono essere soddisfatti determinati requisiti all'interno di tre fasi progettuali:

- Fase di progettazione e sviluppo del progetto agrivoltaico
- Fase operativa
- Fine progetto agrivoltaico.

I requisiti da soddisfare durante la fase di progettazione e sviluppo del progetto sono da considerarsi in base alla tipologia di impianto agrivoltaico da installare e conseguenti lavorazioni necessarie (ad esempio movimentazione del suolo). È importante valutare quali siano quelle operazioni che disturbino di meno la flora e fauna presente nell'areale di installazione e il suolo stesso (es. minore compattamento, minore erosione) e anche il paesaggio al fine di poter avere una continuità agroecologica del sito di interesse.

Durante la fase operativa, sono necessari dei sistemi di monitoraggio per la produzione agricola (vedere punto 13) atti a valutare la fertilità del suolo in base al tipo di coltivazione, al tipo di indirizzo produttivo scelto e al tipo di impianto installato. È necessario valutare la fertilità del suolo in ambiente agrivoltaico e in funzione dell'attività agricola. In questo ultimo caso, la presenza di un'area di riferimento in pieno campo (vedere Appendice B) con la coltura scelta è utile a valutare la fertilità del suolo in condizioni di riferimento di coltivazione e confrontarla con le condizioni presenti in ambiente agrivoltaico in quanto, se le aree vengono gestite in egual modo permettono una valutazione reale di come la fertilità del suolo può essere influenzata dalla presenza del sistema agrivoltaico. Oltre alla valutazione di fertilità del suolo, quest'area è utile al monitoraggio durante tutto il ciclo colturale e per la valutazione della resa agricola ottenuta in condizioni agrivoltaiche e in condizioni di riferimento (pieno campo). Per ulteriori spiegazioni sui sistemi di monitoraggio vedere il punto 10.

Infine, a fine progetto agrivoltaico è di fondamentale importanza valutare l'uso del suolo a seguito di un'installazione agrivoltaica. Questo requisito è da tenere in considerazione sia per le aree che sono da sempre state destinate all'uso agricolo che soprattutto per quelle aree che, prima dell'installazione dell'impianto agrivoltaico, non erano utilizzate per l'attività agricola. Questo aspetto è già indicato nelle Linee Guida MiTE

(requisito E.1) ed è correlato ad un recupero della fertilità del suolo - ad esempio in termini di sostanza organica, stoccaggio di carbonio, fauna tellurica e quindi di produttività di un suolo agricolo. Il requisito E.1 indica l'importanza di monitorare i casi in cui sia ripresa l'attività agricola su superfici agricole non utilizzate negli ultimi 5 anni.

8 REQUISITI TECNICI DEI SISTEMI AGRIVOLTAICI

I sistemi agrivoltaici necessitano di requisiti tecnici da rispettare nelle fasi di progettazione e di gestione di un sistema agrivoltaico sia per la produzione agricola che della produzione energetica. I principali requisiti attualmente presenti in normative e linee guide a livello nazionale, europeo ed internazionale sono riportati nel Prospetto 1.

BOZZA CONSULTAZIONE PUBBLICA

Prospetto 1: Riferimenti normativi e linee guida per lo sviluppo dei sistemi agrivoltaici

Riferimenti normativi/Linee Guida		DIN SPEC 91434	Linee Guida MiTE	AFNOR Label	Linee Guida NEDO	UNI/PdR XX
Caratteristiche costruttive	Integrazione col paesaggio	n.d.	Si	Si	Si	Si
	Altezza libera da terra (m)	> 2.1 m (solo per Categoria 1)	>= 2.1 m (solo per Tipo 1)	n.d. (solo per Classe A)	>2 m (solo per Classe A)	>2.1m (solo per Tipo 1)
	LAOR (%)	n.d.	<= 40%	<= 50%	Varia al variare dell'altezza dei pannelli e delle colture scelte	<= 40%
	Superficie coltivabile dell'impianto (%)	>= 90%	>= 70%	>= 90%	n.d.	>=70%
Prospettive gestionali	Indirizzo produttivo	Mantenuto	Mantenuto	Mantenuto	Mantenuto	Mantenuto
	Presenza area controllo	n.d.	Opzionale	Si (1000m ² – 2000m ²)	n.d.	Consigliato (1000m ² – 2000m ²)
	Presenza dispositivi monitoraggio	n.d.	Si	Si	n.d.	Si
Obiettivo produttivo minimo %	Produzione agricola	>= 66%	Non prevista	>= 90%	>= 80 %	>=70%
Resa agricola	Modalità di verifica della resa per il controllo	Basata sulla produzione degli ultimi 3 anni sullo stesso suolo	Non prevista	Basata su area controllo permanente	Valutazione basata su rese medie passate e rese medie annue della zona circostante (stessa coltura)	Valutazione basata o su resa area di controllo se presente o su rese medie passate e annue della zona circostante
Obiettivo produttivo minimo %	Energia elettrica	n.d.	>= 60% FVstandard	?	n.d.	>=60% FVstandard

8.1 SUPERFICIE MINIMA COLTIVATA

Nel caso di impianti agrivoltaici elevati, la superficie utilizzabile a scopi agricoli è rappresentata dalla porzione di terreno non occupata dalla struttura dell'impianto (per es. pali, tiranti, travi con altezza libera minore di quella definita al punto 6.1.1) considerando anche la distanza che occorre mantenere dalle singole componenti per garantire l'effettiva lavorabilità del terreno (per es. per i pali di supporto della struttura considerando una distanza minima di 50 cm su tutti i lati).

La superficie effettivamente utilizzata a scopi agricoli (S_{agricola}) può differire dalla superficie utilizzabile in funzione dell'effettiva possibilità e interesse dell'agricoltore di coltivare alcune aree all'interno della superficie del sistema agrivoltaico.

Le superficie minima coltivata è un parametro da prendere in considerazione per poter garantire la continuità dell'attività agricola (coltivazioni agricole, floricoltura, pascolo del bestiame) in un sistema agrivoltaico, richiamando così come già indicato dalle Linee Guida MiTE il soddisfacimento del decreto-legge 77/2021. Al fine di garantire che sugli appezzamenti si continui a praticare attività agricola, la percentuale rispetto alla destinazione d'uso della superficie precedente all'installazione è stata definita dalle Linee Guida MiTE pari al 70%. Questo valore garantirebbe il rispetto delle Buone Pratiche Agricole (BPA):

$$S_{agricola} \geq 0,7 \cdot S_{tot}$$

8.2 PERCENTUALE DI SUPERFICIE COMPLESSIVA COPERTA DAI MODULI (LAOR)

Un parametro da considerare per garantire la compatibilità dei sistemi agrivoltaici con l'agricoltura è il livello di ombreggiamento generato dall'impianto sul suolo su cui viene svolta l'attività agricola.

Valutare la densità dell'impianto agrivoltaico sul terreno agricolo in termini di densità di potenza (MW/ha) rappresenta un limite in quanto non può tenere conto del diverso rendimento dei moduli FV presenti sul mercato, per cui moduli di uguale potenza hanno effettivamente una superficie diversa.

Per questo motivo è in realtà più importante utilizzare il parametro di percentuale di superficie complessivamente coperta dai moduli, anche detta Land Area Occupation Ratio (LAOR) o più comunemente Ground Coverage Ratio (GCR).

Le Linee Guida MiTE stabiliscono che la superficie complessiva dei moduli fotovoltaici non superi il 40% della superficie complessiva del sistema agrivoltaico:

$$\frac{S_{pv}}{S_{tot}} = LAOR \leq 40 \%$$

Per il calcolo della superficie complessiva dei moduli fotovoltaici (S_{pv}) bisogna considerare la somma delle superfici individuate dal profilo esterno di massimo ingombro di tutti i moduli fotovoltaici costituenti l'impianto, come dedotte dalla scheda tecnica del modulo utilizzato.

Nel caso di moduli semitrasparenti il valore S_{pv} può essere moltiplicato per il fattore di opacità del modulo (calcolato come $1 - \text{fattore di trasparenza } \eta [\%]$). Nel caso di moduli semitrasparenti si ha quindi che:

$$LAOR = \frac{S_{pv} * (1 - \eta)}{S_{tot}}$$

Nota: Si ritiene comunque che il LAOR non rappresenti un parametro vincolante per la definizione di sistemi agrivoltaici, dal momento che esso non è rappresentativo dell'influenza dell'impianto sull'attività agricola.

8.3 RESA AGRICOLA

Il contenuto del punto 8.3 fa riferimento ai sistemi agrivoltaici che ricadono nelle sottocategorie A e B, in quando la definizione di resa agricola non è applicabile alla sottocategoria C.

La resa agricola (R_a) mette in relazione la quantità di prodotto agricolo con la superficie agricola coltivata. La resa agricola in un sistema agrivoltaico ($R_{a,APV}$) è espressa in (t ha⁻¹) ed è data dal rapporto fra la produzione agricola in agrivoltaico (P_{APV} , t) e la superficie totale del sistema agrivoltaico (ha).

$$R_{a,APV} = \frac{P_{APV}}{S_{tot}}$$

La resa agricola in ambiente agrivoltaico è un parametro utile per confrontare la resa in agrivoltaico con le condizioni di riferimento di produzione agricola, in assenza di impianto agrivoltaico ($R_{a,standard}$, vedere

Appendice B). La resa agricola così come il LER (vedere punto 8.5) va valutata in base al tipo di colture previste sotto l'impianto e per più anni, al fine di creare in questo modo un sistema di monitoraggio della produzione in ambiente agrivoltaico. Inoltre, ottenere dei valori di resa agricola in un sistema agrivoltaico permetterebbe di creare una banca dati con rese ottenute in ambiente agrivoltaico a livello nazionale.

In fase di progettazione dell'impianto agrivoltaico, al fine di poter rispettare il requisito di resa agricola minima, si raccomanda di tener conto dei seguenti fattori:

- tipo di indirizzo produttivo aziendale;
- tipo di coltivazioni;
- possibile perdita di resa connessa a eventi avversi (es. grandine, pioggia, vento) che possono compromettere la resa in determinati anni;
- tipo di sistema agrivoltaico utilizzato (es. fisso, mobile, altezza dei moduli da terra ecc.).

Nelle Linee Guida MiTE, al contrario di quanto già indicato per la superficie minima da coltivare, non è stato indicato un valore minimo di resa agricola in ambiente agrivoltaico (Prospetto 1). Nelle DIN SPEC 91434, Label Projet Agrivoltaïque Afnor e Linee guida NEDO, invece, è possibile trovare delle indicazioni riguardanti il valore minimo di resa agricola da ottenere in ambiente agrivoltaico.

Secondo la DIN SPEC 91434, la riduzione della resa agricola in un sistema agrivoltaico non dovrebbe essere superiore al 34% rispetto a condizioni normali di produzione, cioè senza agrivoltaico, (vedere Prospetto 1). Secondo la Label Projet Agrivoltaïque Afnor, l'impianto agrivoltaico dovrebbe migliorare le condizioni di coltivazione e quindi potenzialmente incrementare le rese o la qualità dei prodotti indicando dei cali produttivi ammessi fino ad un massimo del 10%. Questa riduzione percentuale può variare solo se accuratamente giustificati durante la coltivazione (per esempio per eventi climatici avversi). Infine, secondo le Linee guida NEDO, la riduzione della produzione dovrebbe essere contenuta al 20% e, qualora si verificano delle perdite maggiori, è necessario cambiare gli angoli di inclinazione dei pannelli per favorire una maggiore disponibilità di luce per le colture e, quindi, non limitarne la resa.

Per l'Italia, una riduzione della resa agricola del 30% nell'area interessata dal sistema agrivoltaico rispetto alle condizioni normali di coltivazione (per es. rese in pieno campo) potrebbe essere un valore di riferimento da utilizzare in quanto, rientrando nell'area con clima mediterraneo (secondo la classificazione climatica di Köppen), presenta delle condizioni favorevoli in termini di elementi climatici. Il clima mediterraneo, essendo un clima temperato, è particolarmente secco nel periodo estivo e mite in quello invernale e, considerando il range di latitudine dell'Italia, la disponibilità di radiazione solare è maggiore rispetto a latitudini Nord (per es. Germania); sembra pertanto ragionevole porre una riduzione in termini percentuali leggermente inferiore rispetto a quanto indicato dalla DIN SPEC 91434.

$$(R_{a,standard} - R_{a,APV}) / R_{a,standard} \leq 30\%$$

La percentuale indicata:

1) considera la variabilità di condizioni climatiche che sono presenti da Nord a Sud in Italia (per es. precipitazioni differenti tra Nord e Sud influenzano la disponibilità idrica per le colture o ancora, la radiazione

solare minore al Nord rispetto al Sud potrebbe influenzare la produzione agricola riducendola maggiormente al Nord), e

2) tende a salvaguardare il concetto di sostenibilità del sistema agrivoltaico tramite l'uso del suolo agricolo per la produzione di cibo. In questo caso, la normale conduzione agricola viene rispettata favorendo quindi la produzione di cibo e non soltanto la produzione energetica.

La considerazione sia della resa agricola che della resa energetica (vedere punto 8.4), data la combinazione sinergica di impianti fotovoltaici e pratiche agricole, permette di raggiungere gli obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) n. 2 "Sconfiggere la fame" e n. 7 "Energia accessibile e pulita".

8.4 RENDIMENTO ENERGETICO / PRODUCIBILITÀ ELETTRICA MINIMA

La produzione elettrica specifica di un impianto agrivoltaico (FV_{agri}), è un indicatore che mette in relazione la produzione totale annua di energia elettrica alla superficie utilizzata. La produzione elettrica specifica viene espresso generalmente in ($GWh/ha/anno$) ed è un parametro che si ottiene dal rapporto tra la produzione elettrica annua dell'impianto agrivoltaico e l'area dell'impianto agrivoltaico (Equazione X):

$$FV_{agri} = \frac{P_{agri}}{S_{tot}}$$

dove, P_{agri} = Produzione annuale di energia elettrica (GWh anno-1) del sistema agrivoltaico e S_{tot} = area di installazione dell'impianto agrivoltaico.

È possibile ottenere dati più accurati di FV_{agri} con valori reali (misurati) di P_{agri} . Tuttavia, spesso si ricorre a sistemi di simulazione della conversione di energia da impianti agrivoltaici per scopi progettuali o per analisi di scenario.

Per poter garantire che i sistemi agrivoltaici rappresentino una vera alternativa ai sistemi fotovoltaici tradizionali, è importante garantire che la producibilità elettrica dell'impianto rispetto all'area occupata dallo stesso (FV_{agri}) non si discosti di troppo rispetto a quella di un impianto fotovoltaico tradizionale installato sulla stessa superficie ($FV_{standard}$). Nello specifico, viene richiesto di rispettare il seguente criterio:

$$FV_{agri} \geq 0,6 \cdot FV_{standard}$$

Il calcolo di $FV_{standard}$ può essere effettuato tramite il tool denominato "PVGIS" del JRC (Joint Research Centre della Commissione Europea), disponibile al seguente link https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/it/.

La procedura di inserimento dei dati per la progettazione dell'impianto agrivoltaico deve prevedere:

- l'individuazione del sito (in termini di coordinate geografiche) ove verrà installato l'impianto agrivoltaico;
- la selezione del valore "PVGIS-SARAH2" nel campo "Database di radiazione solare";
- la selezione della tecnologia fotovoltaica "silicio cristallino", nel campo "Tecnologia FV";
- un fattore correlato alle perdite del generatore fotovoltaico lato corrente continua - pari, in ogni caso, al 14%, da inserire nel campo "Perdite di sistema [%]";
- la modalità di installazione "montaggio a terra", presente nel campo "Posizione montaggio";
- il valore pari alla latitudine meno 10 gradi nel campo "Inclinazione";
- il valore 0° nel campo "Orientamento".

Il valore dell'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico (denominato "Produzione annuale FV [kWh]"), presente nella sezione "Riassunto", strettamente correlato al valore di potenza nominale dell'impianto e inserito nell'apposito campo "Potenza FV di picco [kWp]".

La potenza nominale dell'impianto per il calcolo di $FV_{standard}$ deve considerare un impianto fotovoltaico con moduli fissi, con efficienza pari al 20% e con LAOR pari al 49%.

Il calcolo di FV_{agri} dipende dalle caratteristiche dell'impianto agrivoltaico di riferimento e viene lasciata libertà al singolo proponente per la scelta della modalità di calcolo più opportuna (tramite software commerciali), da esporre nella relativa relazione tecnica dell'impianto.

8.5 LAND EQUIVALENT RATIO

Il Land Equivalent Ratio (LER) viene utilizzato per calcolare l'efficienza nell'uso del suolo per un sistema ad un solo indirizzo produttivo (es. solo agricolo o solo elettrico nel caso di fotovoltaici montati a terra) rispetto ad un sistema combinato così come può essere il sistema agrivoltaico. Può essere calcolato con la seguente formula:

$$LER = \frac{FV_{agri}}{FV_{standard}} + \frac{R_{a,APV}}{R_{a,standard}}$$

Nel calcolo del LER in un sistema agrivoltaico ad inseguimento solare è però evidente che, utilizzando la producibilità standard calcolata con definizione di $FV_{standard}$ con moduli fissi descritta al punto 8.4, esso risulterebbe un parametro sottostimato o sovrastimato. Tenuto conto che il calcolo del LER dovrebbe rispecchiare l'evoluzione tecnologica, sarebbe più corretto utilizzare un impianto di riferimento in grado di massimizzare la produzione di energia elettrica⁸.

Seguendo la letteratura corrente, un'altra correzione che viene riportata riguarda la stima della superficie interessata al calcolo di P_{APV} (Produzione agricola in agrivoltaico). Tenendo conto della percentuale S_p (suolo perso) la formula per il calcolo del LER diventa:

$$LER = \frac{FV_{agri}}{FV_{standard}} + \frac{R_{a,APV}}{R_{a,standard}} \times \frac{100 - S_p}{100}$$

Nel computo di S_p si dovrebbe conteggiare la perdita di suolo dovuta alla presenza di elementi strutturali del sistema agrivoltaico. Per un computo ancora più aderente alla realtà, S_p dovrebbe includere anche quelle porzioni di suolo all'interno dell'impianto potenzialmente coltivabili ma che risultano inaccessibili in tutto od in parte alle operazioni di meccanizzazione (semina, lavorazione del suolo, raccolta, ecc.).

I sistemi agrivoltaici che presentano un valore di $LER > 1$ indicano che la produzione agricola ed elettrica del sistema agrivoltaico è più elevata della produzione separata di colture e energia elettrica, al contrario valori di $LER < 1$ indicano che la produttività del sistema agrivoltaico è inferiore alla produzione separata elettrica ed agricola.

Il LER è un indice di valutazione da calcolare su diversi anni a causa delle variazioni degli elementi climatici (es. temperatura, piovosità) che influiscono sulla produzione agricola e sulla produzione di energia elettrica ma anche, per la produzione agricola, al tipo di pratiche di gestione agronomica che vengono attuate per le colture (es. irrigazioni, fertilizzazioni, trattamenti fitosanitari). In diversi studi è stata riportata l'efficienza d'uso del suolo

⁸ Willockx et al., 2022

tramite l'indice LER in ambiente agrivoltaico: uno studio condotto in Germania tra il 2017 e il 2018 ha riportato un aumento del LER del 56% e del 70% rispettivamente nel 2017 nel 2018 (anno caratterizzato da siccità e alte temperature che hanno portato ad un aumento di LER maggiore rispetto al 2017). Altri studi hanno riportato un LER > 1, ad esempio tra 1.3 e 1.7, da 1.3 a 2.05. Nei casi sopra riportati i valori di LER variano anche in base al tipo di sistema agrivoltaico utilizzato.

Al fine quindi di valutare il sistema agrivoltaico utilizzando questo indicatore, è necessario avere più anni di produzione agricola ed energetica. Infatti, utilizzando il LER come indicatore, è opportuno indicare una finestra temporale di raccolta dati in base al tipo di colture coltivate, ad esempio, se si tratta di colture perenni un minimo di 4-5 anni sono necessari per raccogliere i dati da utilizzare per il LER, o, se si tratta di rotazioni colturali almeno 2 anni consecutivi. Così facendo, non soltanto il valore di LER è basato sulla variabilità data dalle condizioni meteorologiche sia per le colture che per la produzione energetica ma, i dati per il calcolo del LER, riferendosi a più colture, fornirebbe dei dati utili anche in fase di progettazione di un sistema agrivoltaico e non solo in fase operativa. Questi dati possono essere raccolti anche per andare a creare una banca dati da utilizzare su scala nazionale.

9 INTEGRAZIONE DELLE ATTIVITÀ AGRICOLE CON LA GESTIONE DEGLI IMPIANTI AGRIVOLTAICI

I risultati presenti in letteratura hanno dimostrato come colture coltivate in ambiente agrivoltaico riescono ad utilizzare l'acqua più efficientemente, tollerano meglio le temperature elevate e sono protette da eventi meteorologici quali ad esempio grandine, stress termico, siccità. Inoltre, è stato dimostrato che il rapporto tra colture e pannelli fotovoltaici è sinergico e può portare ad incrementi di produzione elettrica.

Sono tre principalmente i vantaggi connessi all'incremento della produzione elettrica grazie alla presenza delle colture:

- 1) l'attività evapotraspirativa delle colture, in quanto riducendo la temperatura dell'aria in prossimità dei pannelli provoca un effetto di cooling della superficie del pannello che in questo modo permette un aumento dell'efficienza energetica;
2. la riduzione dell'accumulo di polvere ed altri materiali sui pannelli grazie alla presenza delle colture rispetto ad una condizione di suolo nudo. Infatti, una delle problematiche principali riportate per gli impianti fotovoltaici a terra è la diminuzione di produzione energetica a causa dell'accumulo di polveri sulla superficie del pannello fotovoltaico;
3. l'albedo delle colture che rappresenta un vantaggio per migliorare l'efficienza energetica dei pannelli fotovoltaici grazie alla presenza delle colture al di sotto dei pannelli fotovoltaici rispetto al suolo nudo. Infatti, la capacità delle colture di riflettere maggiormente la luce (albedo) rispetto ad un suolo nudo utilizzando pannelli bifacciali può incrementare la produzione energetica del sistema.

Nei sistemi agrivoltaici, la gestione agronomica del suolo e delle colture può generare delle problematiche per l'accumulo di polveri. Infatti, attraverso le lavorazioni preparatorie, complementari e consecutive del suolo, le varie pratiche agronomiche durante il ciclo colturale (es. concimazione, trattamenti fitosanitari ecc.) e in base alle fasi fenologiche delle colture (es. durante la fioritura in cui la presenza di polline è maggiore) possono causare l'accumulo di polveri sul pannello. Vi sono tuttavia degli accorgimenti da poter attuare al fine di ridurre questo fenomeno, per esempio attraverso la gestione delle macchine e dell'inclinazione dei pannelli fotovoltaici durante le lavorazioni: aumentando l'inclinazione, il rischio che la polvere si accumuli risulta minore. Un ulteriore

accorgimento è quello di far combaciare, laddove possibile, l'ingresso in campo delle macchine per diverse attività agronomiche (per es. per concimazioni o trattamenti fitosanitari), così da evitare il ripetuto ingresso in campo delle macchine al di sotto di un impianto agrivoltaico e quindi limitare l'accumulo di polveri in un preciso momento. Questo accorgimento permetterebbe anche di prevedere la pulizia dei pannelli fotovoltaici in determinati intervalli di tempo evitando di effettuarla ogni qualvolta si effettuano delle operazioni agrarie.

Un ulteriore aspetto da considerare per le operazioni di pulizia dei pannelli riguarda la definizione di interventi da effettuare in determinate fasi del ciclo colturale a seconda della coltura che si ha in campo. Infatti, se vi è una coltura che durante la fase di fioritura tende a rilasciare nell'aria una quantità di polline tale da accumularsi sui pannelli, è bene operare al termine di questa fase fenologica o successivamente alle varie fasi agronomiche. In questo modo, non solo si garantisce un ingresso per la pulizia dei pannelli in periodi definiti ma si evita un ulteriore compattamento del suolo a causa dell'ingresso delle macchine. Questo aspetto riguardante le fasi fenologiche non è da considerarsi tale solo per la fioritura ma è da valutare in base al tipo di coltura che si sta coltivando. Inoltre, un altro aspetto riguardante le lavorazioni in campo da attenzionare riguarda la velocità di lavorazione delle macchine, in quanto maggiore è la loro velocità maggiore è il sollevamento di polvere dal suolo. Quindi, gestendo contemporaneamente gli aspetti precedentemente descritti è possibile migliorare la gestione del sistema agrivoltaico.

Altri aspetti da tenere in considerazione per una migliore integrazione dell'attività agricola con l'impianto fotovoltaico sono:

- la scelta delle macchine e degli organi lavoranti in base alla distanza fra i singoli tracker o in base all'altezza dei pannelli;
- la pratica agronomica scelta (per es. minimum tillage, zero tillage, strip-tillage ecc.) in base al tipo di coltura e di suolo così da gestire efficacemente l'impianto agrivoltaico;
- l'altezza delle colture in base al tipo di sistema agrivoltaico;
- le diverse soluzioni tecnologiche che possono essere utilizzate al fine di poter migliorare l'integrazione del sistema agrivoltaico con l'attività agricola. Una di queste riguarda l'utilizzo dell'acqua piovana. Un sistema di raccolta dell'acqua dalla superficie dei moduli fotovoltaici del sistema agrivoltaico può svolgere una doppia funzione: utilizzare l'acqua raccolta per pulire i moduli dalla polvere e dall'accumulo di altri materiali e fornire una riserva irrigua specialmente nei mesi siccitosi. L'uso dell'acqua raccolta, combinata a sistemi di microirrigazione, consentirebbe un ulteriore efficienza nell'utilizzo d'acqua da parte delle colture (Figure 6 e 7).



Fig. 6 Sistemi di raccolta di acqua piovana in un impianto agrivoltaico⁹



Fig. 7 Sistemi di raccolta di acqua piovana in un impianto agrivoltaico¹⁰

10 INTEGRAZIONE DEI SISTEMI AGRIVOLTAICI CON IL PAESAGGIO

A scopo esemplificativo e non esaustivo, si riportano di seguito alcune indicazioni generali per ridurre al massimo la discontinuità introdotta dal sistema agrivoltaico nella trama del paesaggio. Questo viene fatto alle varie scale, corrispondenti a diversi aspetti del processo progettuale: dalla scala della pianificazione territoriale, a quella del paesaggio, a quella del progetto del sistema.

Prospetto 2: Indicazioni generali per l'integrazione dei sistemi agrivoltaici col paesaggio in base alle fasi progettuali

SCALA TERRITORIALE	La dimensione della tessera non dovrebbe essere preponderante rispetto alle dimensioni medie delle tessere presenti nel paesaggio.
	La concentrazione delle tessere dovrebbe essere gestita in modo da non generare l'effetto visivo che gli elementi artificiali (moduli e strutture) dominino sul paesaggio esistente.
	Gli interventi dovrebbero essere limitati a zone in cui visibilità da punti di interesse sia limitata.
SCALA DEL PAESAGGIO	La dimensione della tessera non dovrebbe essere preponderante rispetto alle dimensioni medie delle tessere presenti nel paesaggio (grande/piccola)
	La forma della tessera dovrebbe essere simile a quella delle tessere agricole presenti nel paesaggio (allungata, quadrata...).
	La giacitura delle file dei moduli, e cioè l'orientamento della trama, dovrebbe armonizzarsi con quello del paesaggio, e cioè seguire le giaciture esistenti (orientamento dei moduli simile, ad esempio, a quello dei filari di alberi esistenti).
	La trama della tessera dovrebbe essere simile a quella del paesaggio esistente (poroso/denso). Per questo la distanza tra le file dei moduli, quindi, dovrebbe essere simile a quella tra gli elementi lineari esistenti.

⁹ Fonte: Chloride Exide LTD and the University of Sheffield

¹⁰ Fonte: BayWa r.e./GroenLeven

	L'altezza dei sistemi che compongono la trama tridimensionale del sistema agrivoltaico dovrebbe essere simile a quella degli elementi esistenti.
	Il colore della tessera dovrebbe armonizzarsi con quello del paesaggio.
SCALA DEL SISTEMA AGRIVOLTAICO	I moduli fotovoltaici (tessere) dovrebbero essere scelti in maniera da consentire le armonizzazioni suggerite alla scala del paesaggio. Nello specifico, la forma, la dimensione, il colore e il grado di trasparenza dei moduli, sono i parametri progettuali che maggiormente incidono sulle prestazioni visive del sistema e dovrebbero pertanto essere scelti in funzione della desiderata prestazione visiva.
	Il sistema di supporto dovrebbe essere scelto in modo da consentire le armonizzazioni suggerite alla scala del paesaggio. In particolare, deve essere posta attenzione alla scelta dell'altezza dei moduli fotovoltaici da terra, e quindi del sistema di supporto; andrebbe inoltre scelto un sistema di supporto dei moduli che consenta di svincolare l'orientamento delle file dei moduli dall'allineamento est ovest per allinearsi ad eventuali giaciture già presenti nella trama del paesaggio. Rispetto a questa condizione, un sistema ad inseguimento su doppio asse consente il massimo grado di libertà.

11 RICADUTE SUL TERRITORIO E SULLA COMUNITÀ

I sistemi agrivoltaici oltre a produrre, in modo sinergico ed integrato, risorse per il fabbisogno alimentare ed energetico possono generare ricadute positive sulla comunità locale ed in generale sul territorio dove insistono; ovviamente, la rilevanza di questi effetti dipende dal maggior o minore grado di integrazione conseguito a livello sistemico e questo rilancia l'opportunità di una loro buona e qualificata progettazione. Un progetto agrivoltaico può generare effetti sulla comunità e sul territorio, effetti che si potrebbero chiamare esternalità, centrando una sempre crescente accettazione sociale ed un allineamento con i target di sostenibilità posti dall'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite e, non ultimo, rendendo più semplice e con maggiore probabilità di esito favorevole le procedure autorizzative. La descrizione di queste esternalità potrebbe essere fornita ad esempio con una relazione di sostenibilità attraverso l'individuazione di quali e quanti benefici anche a lungo termine, come crescita, sviluppo e produttività, ne possono realmente scaturire, minimizzando, al contempo, gli impatti negativi. La produzione di questa relazione può essere consigliata, anche in relazione alla natura del progetto e del suo impatto sul territorio, per rispondere o ovviare ad eventuali obiezioni che si dovessero generare nel corso del progetto autorizzativo.

La relazione potrebbe includere:

- l'asseverazione del rispetto del principio di "non arrecare un danno significativo" ("Do No Significant Harm" – DNSH) di cui al regolamento (UE) 2019/2088, come richiamato dal Regolamento UE 852/2020, dal Regolamento (UE) 2021/241 e come esplicitato dalla Comunicazione della Commissione Europea COM (2021) 1054 (Orientamenti tecnici sull'applicazione del citato principio, a norma del regolamento sul dispositivo per la ripresa e la resilienza);
- la stima dell'impronta di carbonio (carbon footprint) del progetto in relazione al ciclo di vita e il contributo al raggiungimento degli obiettivi climatici;

- la valutazione del ciclo di vita dell'opera (Life Cycle Assessment – LCA) in ottica di economia circolare, seguendo le metodologie e gli standard internazionali (serie UNI EN ISO 14040);
- l'analisi del consumo complessivo di energia con l'indicazione delle fonti per il soddisfacimento del bisogno energetico, la definizione delle misure per ridurre le quantità degli approvvigionamenti esterni (riutilizzo interno all'opera) e delle opzioni di modalità di trasporto più sostenibili dei materiali verso/dal sito;
- la stima degli impatti socio-economici del progetto;
- l'individuazione delle misure di tutela di un lavoro dignitoso per tutte le figure occupate nell'attività agrivoltaica;
- l'indicazione dei contratti collettivi nazionali e territoriali di settore;
- l'utilizzo di soluzioni tecnologiche innovative;
- l'analisi di resilienza.

Si ricorda, inoltre, che anche il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), riconosce l'importanza delle comunità energetiche. Nella sua Missione 2 infatti, prevede il finanziamento di circa 2 miliardi di euro a supporto di iniziative per la creazione di energy community e sistemi di autoconsumo.

12 TIPOLOGIE DI SOGGETTO RESPONSABILE DEI SISTEMI AGRIVOLTAICI

Il soggetto responsabile dell'impianto agrivoltaico può essere (a titolo esemplificativo e non esaustivo):

- a) una impresa agricola (singola o associata) che realizza l'impianto su un terreno agricolo di sua proprietà. Affinché venga mantenuto lo status di imprenditore agricolo e la produzione di energia elettrica venga considerata "attività connessa" (nel rispetto della normativa vigente in tema di definizione della figura dell'imprenditore agricolo e delle attività agricole come descritto nel D.lgs. 18 maggio 2001, n. 228) è necessario che il fatturato derivante dalla vendita dell'energia elettrica non superi quello derivante dall'attività agricola;
- b) una impresa del settore energetico che realizza l'impianto su un terreno agricolo stipulando contratti per l'ottenimento del diritto di superficie per un periodo almeno pari alla vita utile dell'impianto. Inoltre, è necessaria la stipula di un accordo tra il Soggetto Responsabile e il proprietario del terreno su cui insiste l'impianto che garantisca la continuità dell'attività agricola su tale terreno, nel rispetto del requisito B delle Linee Guida MiTE;
- c) Un proprietario terriero o un insieme di proprietari terrieri, non necessariamente impresa agricola, che vogliono realizzare un impianto agrivoltaico su un terreno di loro proprietà, costituendo una società di scopo. Anche in questo caso deve essere garantita la continuità agricola ad esempio tramite la stipula di un accordo con una impresa agricola che utilizzi il terreno a fini agricoli.

Per tutte le casistiche sopra descritte, è possibile utilizzare parte dell'energia prodotta per autoconsumo (sia dell'azienda agricola o di altre attività che possono essere connesse all'impianto mediante linea diretta) e/o all'interno di Comunità Energetiche Rinnovabili (CER).

13 MONITORAGGIO DEI SISTEMI AGRIVOLTAICI

I sistemi agrivoltaici possono contare, in linea di principio, su due distinti sistemi di monitoraggio: quello relativo all'impianto fotovoltaico (MFV) e quello relativo al sistema di produzione agricola (MPA) descritti ai punti seguenti.

13.1 SISTEMA DI MONITORAGGIO FOTOVOLTAICO (MFV)

Nati storicamente per correlare la produzione energetica di un impianto fotovoltaico alle caratteristiche della radiazione solare incidente su di esso, i sistemi MFV sono oggi funzionali all'attivazione ed alla implementazione di una pluralità di azioni che possono essere sinteticamente elencate come di seguito:

- a) Misura della produzione energetica dell'impianto;
- b) Misura della resa energetica dell'impianto;
- c) Stima della produzione energetica dell'impianto nel tempo;
- d) Valutazione della correlazione tra produzione energetica e variabili ambientali;
- e) Stima dell'incidenza di guasti e/o inefficienze che pregiudicano la produzione energetica dell'impianto e/o comportano un aumento del costo dell'energia prodotta;
- f) Stato ed integrità dell'impianto;
- g) Attivazione di interventi per ottimizzare la produttività.

Per quanto concerne la valutazione dello stato e della integrità dell'impianto, anche in termini di sicurezza, questa può essere valutata, se necessario, con l'intervento in campo di un tecnico specializzato che può effettuare, con opportuna cadenza, test di integrità meccanica dei componenti dell'impianto e del loro livello di isolamento elettrico in conformità alle norme vigenti¹¹

La possibilità di abilitare le funzionalità di monitoraggio fotovoltaico è legata alla presenza o meno sull'impianto di una rete di sensori con funzionamento in continuo. I principali, come da norma di riferimento CEI EN IEC 61724-1, sono classificabili in due famiglie:

- 1) Sensori ambientali
 - a) Radiazione solare (diretta, diffusa, albedo);
 - b) Temperatura ambiente;
 - c) Direzione e velocità del vento;
 - d) Pioggia;
 - e) Neve;
 - f) Umidità relativa;
- 2) Sensori di controllo e gestione dell'impianto
 - a) Temperatura modulo;
 - b) Indice di soiling;
 - c) Allineamento moduli;

¹¹ CEI EN 61557-8, CEI EN 61557-9:2016-10 / CEI 85-30

- d) Misuratori di tensione AC/DC;
- e) Misuratori di corrente AC/DC;
- f) Misuratori di potenza;
- g) Contatori di energia;
- h) Misuratori di interfaccia con la rete;
- i) Misuratori/attuatori orientamento impianto (trackers);

Oltre a questo tipo di sensoristica su impianto, il monitoraggio può fare oggi riferimento anche a dati satellitari per quanto concerne sia la stima dell'irraggiamento solare (secondo CEI EN IEC 61724-1) sia per quanto riguarda i dati meteorologici necessari per implementare le funzioni di stima nel tempo della produzione energetica.

Va infine osservato che, seppure non presenti nella CEI EN IEC 61724-1, sono altresì ormai di uso sempre più diffuso sugli impianti fotovoltaici sensori di inquinamento ambientale. Meno comuni sono l'utilizzo di sistemi UAV per il monitoraggio, generalmente per via termografica, dell'integrità funzionale dei pannelli fotovoltaici e la presenza di spettroradiometri per la determinazione dello spettro della radiazione incidente.

13.2 SISTEMA DI PRODUZIONE AGRICOLA (MPA)

Il sistema di monitoraggio della produzione agricola (compresa anche quella collegata all'allevamento animale) ha come obiettivi funzionali principalmente:

- a) Stime di produzione agricola;
- b) Stime di resa della produzione agricola;
- c) Valutazione degli aspetti agro-meteorologici;
- d) Stime dei tempi di raccolta;
- e) Valutazione degli aspetti fitosanitari delle colture;
- f) Valutazione dei fabbisogni irrigui;
- g) Attuazione degli interventi necessari alla ottimizzazione della produttività;

Per tutte queste funzioni è centrale il ruolo dell'agronomo che può intervenire, ad esempio per le valutazioni di cui alla lettera e) precedente, effettuando specifiche analisi di laboratorio su prove in campo.

L'abilitazione delle funzioni di monitoraggio della produzione agricola può essere spesso effettuata con continuità anche attraverso l'utilizzo di reti di sensori che operano in tempo reale. Questi sensori sono tipicamente:

- 1) Sensori di temperatura ambiente;
- 2) Sensori di umidità relativa;
- 3) Sensori del punto di rugiada;
- 4) Sensori di pioggia;
- 5) Sensori di Pressione Barometrica;
- 6) Sensori di Velocità del vento;
- 7) Sensori di Temperatura suolo;
- 8) Sensori di Conducibilità suolo;
- 9) Sensori di pH del suolo;
- 10) Sensori di Umidità suolo;
- 11) Sensori di Temperatura pianta;
- 12) Sensori di Livello CO₂;
- 13) Spettrofotometria VIS-IR;
- 14) Contatori di flusso acqua di irrigazione;

Le misure effettuate in ambito agricolo sono molto spesso georeferenziate e, in alcuni casi, possono essere ottenute attraverso misure satellitari ed attraverso UAV. In qualche caso, quando si voglia far riferimento alla cosiddetta agricoltura di precisione, questi temi sono stati codificati nelle linee guida emesse dal ministero competente (Linee Guida MPAAF).

In generale, per impianti FV di potenza significativa, i dati prodotti dai sistemi MFV sono asserviti all'utilizzo in uno specifico SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) finalizzato alla gestione ottimale ed automatizzata dell'impianto fotovoltaico in cui possono essere implementate logiche di Intelligenza Artificiale (AI) volte alla ottimizzazione della produzione energetica nel tempo.

Allo stesso modo per sistemi agricoli, i dati MPA possono essere utilizzati per il monitoraggio in continuo dello stato delle colture e per l'ottimizzazione degli interventi irrigui e fitosanitari, volti alla massimizzazione della produzione agricola.

13.3 RACCOMANDAZIONI SUL MONITORAGGIO

Ai fini previsti per queste norme si raccomanda quanto segue:

- 1) Per l'installazione di impianti fotovoltaici in ambito agricolo si raccomanda l'adozione di sistemi di monitoraggio MFV ed MPA in numero che tenga conto delle condizioni di disomogeneità dell'area da monitorare.
- 2) I dati di natura ambientale prodotti dai sistemi di monitoraggio dell'impianto fotovoltaico installato in area agricola (p.e. radiazione globale, diretta, albedo, inquinamento, etc.) dovrebbero essere resi disponibili ai sistemi di analisi dati MPA, se esistenti. Se questi ultimi non sono presenti, i dati ambientali MFV devono comunque essere resi disponibili in maniera tale da poter essere utilizzati anche per fini di ottimizzazione della produzione agricola in conformità a quanto previsto dal punto D2 delle Linee Guida MiTE.
- 3) I dati di energy forecasting della produzione elettrica, ottenuti attraverso algoritmi che tengono conto anche delle locali condizioni meteorologiche, devono essere resi disponibili in maniera da poter essere

utilizzati anche per fini di ottimizzazione della produzione agricola in conformità a quanto previsto dal punto D2 delle Linee Guida MiTE e per fini di ottimizzazione dell'utilizzo della risorsa idrica come da punto D1 delle Linee Guida MiTE.

- 4) Quando lo stato di crescita delle colture è monitorato in ambito MPA attraverso sistemi spettrofotometrici o satellitari, si raccomanda che questi dati vengano resi disponibili ai sistemi SCADA-FV per valutazioni di previsione della produzione energetica.
- 5) Quando a valle di analisi dei dati MPA si determina la necessità di attuare definite azioni in ambito agricolo (p.e. irrigazione; interventi fitosanitari; raccolta etc.) si raccomanda che queste informazioni siano trasferite agli SCADA –FV per definire i tempi di interdizione degli impianti fotovoltaici e/o gli interventi di O&M (p.e. pulizia) necessari.
- 6) Per impianti fotovoltaici orientabili, si raccomanda che i dati dai sistemi MPA siano utilizzati per aggiustare l'orientamento dell'impianto stesso nel tempo in modo da proteggere e massimizzare la produttività agricole modulando di conseguenza la produzione energetica.
- 7) Si raccomanda l'utilizzo dei dati dei sistemi MFV di cui ai punti I) e II) per la valutazione di quanto previsto ai punti E1, E2 ed E3 delle Linee Guida MiTE.
- 8) In particolare si raccomanda l'adozione di reti di sensori MPA distribuite sull'intera area agricola, sia interessata che no dalla presenza dell'impianto fotovoltaico, per ottenere, attraverso metodologie di IA, informazioni sulla qualità del suolo e sull'effetto che l'O&M dell'impianto FV possono produrre sulla fertilità stessa del suolo.
- 9) Le metodologie di cui al punto precedente dovrebbero infine tenere conto delle analisi di laboratorio effettuate da personale specializzato con cadenza massima di un anno.

APPENDICE A – Riferimenti legislativi e normativi per i requisiti di sicurezza di impianti agrivoltaici

La presente Appendice ha l'obiettivo di fornire un riepilogo dei riferimenti legislativi e normativi per i requisiti di sicurezza degli impianti agrivoltaici.

A1. Riferimenti normativi generali

- CEI 64-8 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua.

In particolare, per la sicurezza degli impianti elettrici fotovoltaici si deve fare riferimento alla sezione 712 della Parte 7. La sezione 705 della stessa norma (CEI 64-8) si applica agli impianti elettrici fissi delle strutture agricole o zootecniche, sia all'interno che all'esterno degli edifici.

- Raccomandazioni aggiuntive più specifiche per gli impianti agrivoltaici sono trattate dalla CEI PAS 82-93. Questo documento fa riferimento in termini generali alla valutazione dei rischi elaborata dal Committente ai sensi del D.Lgs. 81-2008 che deve considerare le attività agricole, le tipologie delle colture e di allevamento di bestiame, le relative lavorazioni, le sostanze chimiche e i mezzi agricoli utilizzati, i rischi elettrici derivanti dalla presenza dell'impianto agrivoltaico, la presenza di personale sia per le attività agricole sia per gli impianti elettrici, rischio di incendio, ecc.
- CEI 82-25 Guida alla progettazione, realizzazione e gestione di sistemi di generazione fotovoltaica
- CEI 11-27 Lavori su impianti elettrici

A2. Requisiti dei moduli fotovoltaici (principali)

- CEI EN 61730-1 Qualificazione per la sicurezza dei moduli fotovoltaici (FV) Parte 1: Prescrizioni per la costruzione
- CEI EN 61730-2 Qualificazione per la sicurezza dei moduli fotovoltaici (FV) Parte 2: Prescrizioni per le prove
- CEI EN 61215 (serie) Moduli fotovoltaici (FV) per applicazioni terrestri - Qualifica del progetto e omologazione del tipo
- È raccomandata la disponibilità della seguente certificazione solo per impianti realizzati in zone costiere: CEI EN 61701 Prova di corrosione da nebbia salina dei moduli fotovoltaici (FV)
- È altresì obbligatorio l'adempimento alle Disposizioni derivante dal D.lgs. 49/2014 e s.m.i. per la gestione dei RAEE derivanti da AEE di fotovoltaico.

A3. Requisiti di connessione alla rete e degli inverter fotovoltaici

- CEI 0-16 Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti AT e MT delle imprese distributrici di energia elettrica
- CEI 0-21 Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica
- CEI EN 62109-1 Sicurezza degli apparati di conversione di potenza utilizzati in impianti fotovoltaici di potenza - Parte 1: Prescrizioni generali
- CEI EN 62109-2 Sicurezza dei convertitori di potenza utilizzati negli impianti fotovoltaici Parte 2: Prescrizioni particolari per gli inverter

A4. Requisiti degli inseguitori solari per moduli fotovoltaici

- CEI EN 62817 Impianti fotovoltaici - Qualifica di progetto per inseguitori solari

A5. Requisiti degli impianti fotovoltaici

Si raccomanda la conformità ai requisiti dei seguenti documenti normativi:

- CEI 82-25 Guida alla progettazione, realizzazione e gestione di sistemi di generazione fotovoltaica
- CEI EN 62446-1 Sistemi fotovoltaici (FV) - Prescrizioni per le prove, la documentazione e la manutenzione. Parte 1: Sistemi fotovoltaici collegati alla rete elettrica - Documentazione, prove di accettazione e verifica ispettiva

BOZZA CONSULTAZIONE PUBBLICA

APPENDICE B - Area di monitoraggio delle colture: resa e fertilità del suolo

B.1 Modalità per la stima della produzione

Prendendo in considerazione le Linee Guida MiTE, non è indicata la superficie dell'area di controllo esterna all'area del sistema agrivoltaico per monitorare e stimare la resa agricola in condizioni di riferimento di crescita delle colture agrarie.

Nella DIN SPEC 91434 non vengono indicate le superfici delle aree di controllo ma sono presenti delle indicazioni riguardo due situazioni da prendere in considerazione:

a) le colture sono già state coltivate sull'intera area del progetto o su altre aree dell'azienda.

Per le colture permanenti e i pascoli, si calcola la media delle rese degli ultimi 3 anni. Nelle rotazioni di seminativi la resa deve essere valutata considerando la media produttiva nei 3 cicli precedenti di rotazione delle singole colture.

b) Le colture non sono ancora state coltivate nell'azienda: rese medie degli ultimi tre anni tratte da pubblicazioni pertinenti.

Richiamando l'Afnor Label Projet Agrivoltaïque, invece, è possibile individuare un'area di controllo esterna al sistema agrivoltaico per monitorare la riduzione della produzione (posta entro 150 m dall'impianto). Il confronto deve avvenire ogni anno per coltura (vedere punto B.2).

Considerando infine le Linee guida NEDO, è possibile individuare come modalità della stima del calo produttivo in impianti agrivoltaici la resa media della produzione agricola che si è avuta sia negli anni precedenti o nelle aree circostanti con le stesse specie agrarie.

B.2 Monitoraggio agronomico

B.2.1 DIN SPEC 91434

La DIN SPEC 91434 non prevede un vero e proprio piano di monitoraggio ma stabilisce che in fase di progettazione siano fissati dei criteri ed un piano agronomico coerente con le caratteristiche dell'impianto (piano di utilizzo di tre anni dopo la costruzione dell'impianto).

Il piano di utilizzo deve descrivere in dettaglio come verrà utilizzato il terreno nei tre anni successivi alla costruzione dell'impianto agrivoltaico, o nell'ambito di un ciclo di rotazione delle colture. La proposta dovrà prestare particolare attenzione ai seguenti punti:

- installazione
- perdita di suolo
- fattibilità delle operazioni di lavorazione del terreno
- disponibilità di luce e omogeneità
- disponibilità di acqua
- erosione del suolo
- montaggio e smontaggio senza lasciare residui
- calcolo dell'efficienza economica.

B.2.2 AFNOR Label Projet Agrivoltaïque

Nel documento AFNOR viene suggerito di scegliere un'area con caratteristiche pedologiche non dissimili da quelle in cui avviene la coltivazione in agrivoltaico e con la stessa gestione agronomica (per es. stesso metodo di produzione agricola, biologico o convenzionale). L'area non dovrebbe subire l'ombreggiamento dell'impianto limitrofo e collocarsi, preferibilmente, nelle immediate vicinanze ad una distanza non superiore a 150 metri. La dimensione dell'area è da differenziarsi a seconda della tipologia di colture.

- Area di controllo di 1000 m²:

- Colture vegetali: funghi, erbe aromatiche, ortaggi a bulbo, a fiore, a foglia, a frutto, a radice, a stelo, a tubero e legumi da orto.

- Piante aromatiche e medicinali

- Actinidia, Frutti minori (es. lampone, more), vite
 - Piante ornamentali
- Area di controllo di 2000 m²:
- Colture da pieno campo: cereali, colture foraggere, luppolo, mais, sorgo, oleaginose, piante da fibra, colture proteiche, tabacco, terreni a riposo, barbabietole
 - Arboree: agrumi, alberi da frutta secca, drupacee, pomacee.

Se nello stesso sistema agrivoltaico sono presenti più coltivazioni, l'area di controllo deve essere rappresentativa per almeno 2 delle varietà più emblematiche, tenendo conto delle aree di controllo definite precedentemente.

Oltre alla misurazione della produzione commerciale (t ha⁻¹) è richiesto di valutare la qualità dei prodotti in termini di calibro, valore nutrizionale e caratteristiche estetiche.

Come per la DIN SPEC 91434, anche l'Afnor Label Projet Agrivoltaïque richiede la valutazione di numerosi parametri agronomici al fine di dimostrare che l'impianto agrivoltaico migliora le condizioni di coltivazione. In particolare sono richieste:

- misure della temperatura per dimostrare la riduzione di stress termico nelle colture coltivate in agrivoltaico in estate e l'effetto di mitigazione sulle basse temperature di inverno;
- verifica della riduzione del consumo idrico e dell'evapotraspirazione delle colture;
- attenzione agli effetti sul suolo (soprattutto compattazione);
- valutazione degli effetti di mitigazione su condizioni climatiche avverse (riduzione delle scottature da caldo, dei danni da grandine, danni da gelo)
- verifiche sul rispetto dei vincoli paesaggistici, sulla conservazione della biodiversità, riduzione dell'uso dei prodotti fitosanitari, stimolo all'implementazione di pratiche agro-ecologiche.

B.2.3 Linee guida MiTE

Richiamando le indicazioni riportate nelle Linee Guida MiTE, il monitoraggio deve essere funzionale a raccogliere i dati e le informazioni per l'allestimento dei dossier da presentare alle autorità competenti ai fini della fruizione di incentivi statali (DL 77/2021) secondo i seguenti requisiti:

- D.1) il risparmio idrico;
- D.2) la continuità dell'attività agricola, ovvero: l'impatto sulle colture, la produttività agricola per le diverse tipologie di colture o allevamenti e la continuità delle attività delle aziende agricole interessate;
- E.1) il recupero della fertilità del suolo;
- E.2) il microclima;
- E.3) la resilienza ai cambiamenti climatici.

APPENDICE C - Approfondimento sull'integrazione dei sistemi agrivoltaici con il paesaggio

C1. La prestazione visiva dei sistemi agrivoltaici

C1.1 Premessa

In accordo con la Convenzione Europea del Paesaggio (Firenze, 2000), il termine "paesaggio" designa una determinata parte di territorio, così come è percepita dalle popolazioni, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni. Il Codice dei beni culturali e del paesaggio "tutela il paesaggio relativamente a quegli aspetti e caratteri che costituiscono rappresentazione materiale e visibile dell'identità nazionale, in quanto espressione di valori culturali."

È chiaro, quindi, che oltre alle prestazioni energetiche ed agricole di un sistema agrivoltaico, esiste anche una percezione non presa in considerazione da un approccio solo tecnico. Considerato che la percezione umana è per l'80% legata agli aspetti visivi, appare chiaro come sia necessario formulare un approccio alla considerazione della prestazione visiva dei sistemi agrivoltaici.

C1.2 Indicazioni metodologiche di massima

Non esiste un modo a priori per garantire che l'integrazione di un sistema agrivoltaico nel paesaggio sia efficace poiché questo è mediato dalla qualità del progetto, che deve essere non solo un progetto tecnico, ma anche un progetto di paesaggio.

Affinché un progetto di agrivoltaico sia un progetto di paesaggio, gli elaborati di progetto devono includere una appropriata analisi paesaggistica, che a titolo di esempio, e non in maniera esaustiva, consideri: le caratteristiche del paesaggio in cui si inserisce il progetto; le indicazioni fornite dal Piano Territoriale Paesaggistico Regionale, PTPR (dove esistente); i sistemi idrogeologici; lo studio della visibilità e della percezione del paesaggio; le caratteristiche del paesaggio storico.

C1.3 Percezione del paesaggio ed agrivoltaico: criteri per una buona integrazione

In accordo con quanto evidenziato in premessa, sembra necessario analizzare gli elementi progettuali che concorrono alla prestazione visiva dei sistemi agrivoltaici, e quindi alla loro percezione.

La percezione visiva è un fenomeno estremamente complesso (essendo una sintesi di aspetti formali e cognitivi); l'analisi dovrebbe basarsi sulla lettura di alcuni pareri di soprintendenze e prescrizioni fornite in sede di valutazione di impatto ambientale in fase di autorizzazione di impianti fotovoltaici a terra che evidenziano quali siano gli aspetti minimi di cui tenere conto per una soddisfacente integrazione dei sistemi agrivoltaici nel paesaggio.

Dalla lettura di tali documenti è possibile estrapolare almeno due frequenti categorie di giudizio prettamente visive, e cioè l'impatto visivo e la variazione della trama del paesaggio (che sembrano tra l'altro essere aspetti strettamente connessi).

A queste categorie di giudizio si agganciano poi delle indicazioni progettuali di natura prettamente qualitativa, che si riferiscono ad aspetti che concorrono alla creazione dell'immagine visiva dei sistemi e dunque alla loro percezione.

Si richiede, ad esempio, che il layout dell'impianto scongiuri gli effetti negativi sui caratteri, le forme, i cromatismi, la struttura e la percezione del paesaggio locale e del contesto di riferimento, e che questo venga fatto attraverso una risagomatura dei campi fotovoltaici meno rigida e meno fitta.

Il suggerimento di fatto ha a che fare con l'indicazione di rendere il sistema agrivoltaico quanto più possibile "somigliante" a quanto pre-esiste, in maniera da ridurre al massimo la discontinuità della sua percezione rispetto alla trama originaria del paesaggio e ridurre l'alterazione della percezione visiva del paesaggio esistente.

Un sistema agrivoltaico è anche un oggetto visivo, prima ancora di essere un sistema integrato e complesso e quindi esso è come grande o piccolo, ad esempio, a seconda dell'estensione della sua area, indipendentemente dalla sua potenza nominale, secondo le caratteristiche del paesaggio in cui è inserito, e cioè se sarà un elemento predominante rispetto a quel paesaggio oppure no.

C2. Il pattern del sistema agrivoltaico

Il termine "pattern" è una parola inglese di difficile traduzione in italiano, che indica la disposizione ripetitiva di certi oggetti, ed è un concetto al quale si ricorre per lo studio del paesaggio nel campo degli studi sull'ecologia

del paesaggio. È un modello descrittivo che costituisce uno strumento trans-disciplinare, poiché le caratteristiche spaziali di un certo pattern sono riconoscibili da chiunque, mentre i concetti ad esse associati possono variare secondo la disciplina di riferimento.

Capire un pattern del paesaggio è il punto di partenza per analizzarne le funzioni e quantificarne le prestazioni poiché ad ogni pattern corrispondono le prestazioni ecologiche di una certa parte di un paesaggio.

In accordo con l'approccio proposto dalle Linee guida MiTE, si propone la lettura dei sistemi agrivoltaici come dei "pattern spaziali tridimensionali".

Un sistema agrivoltaico può essere descritto come un *pattern* (trama) del mosaico del paesaggio, alle scale appropriate; agli attributi visivi del pattern del sistema agrivoltaico possono poi essere associati specifici pattern funzionali.

La *patch* (tessera) è un elemento individuale del paesaggio incorporato nella matrice, che possiede caratteristiche omogenee e si distingue dal resto; *corridors* sono elementi lineari di connessione; *matrix* (matrice) è un predominante tipo di uso del suolo.

Il modello sopra introdotto può essere utilizzato a qualunque scala. Considerato un singolo impianto agrivoltaico come una tessera del paesaggio, sarà possibile descriverne le caratteristiche della specifica organizzazione spaziale e tecnologica che esprime.

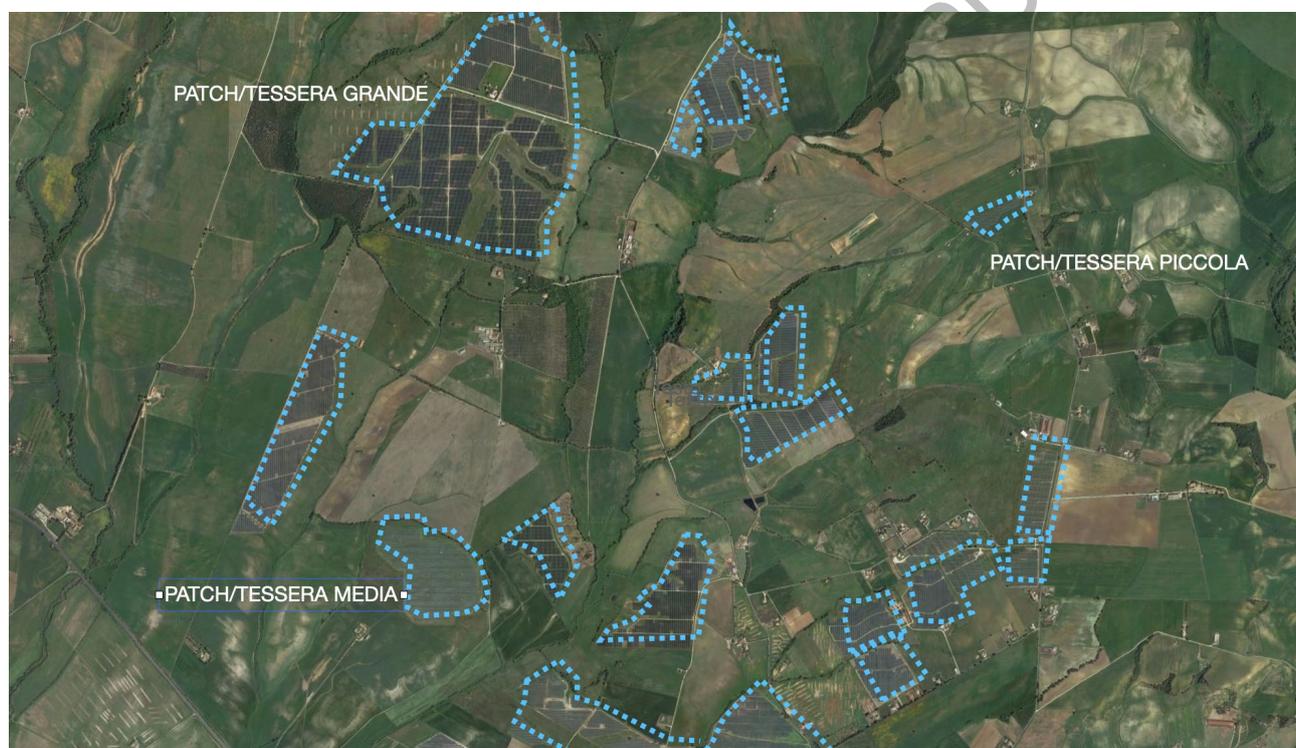


Figura C2: Porzione di mosaico del paesaggio presso Montalto di Castro, in cui si evidenzia la presenza di diversi impianti fotovoltaici, riconoscibili soprattutto grazie al colore. Sono state evidenziate alcune delle *patch* corrispondenti agli impianti fotovoltaici inseriti in una matrice agricola.

C3. Descrizione del sistema agrivoltaico

Il sistema fotovoltaico è considerato nelle sue multiformi caratteristiche e descritto in maniera coerente in termini di caratteristiche spaziali, caratteristiche energetiche, caratteristiche ingegneristiche.

Le caratteristiche spaziali sono distinte in Pattern e Tessera. Il Pattern definisce la configurazione spaziale dei moduli (in maniera quantitativa: con grandi tessere o con piccole tessere; e qualitativa: larghezza, lunghezza, area); la Geometria (a strisce parallele; disposizione a scacchiera; disposizione a isola); Tipo (Continuo; Diffuso; Causale); Densità (poroso o denso, e Land area Occupation Ratio-LAOR).

In questa lettura, la tessera costituisce la singola unità spaziale di una striscia che configura un pattern, e cioè il modulo stesso; ma anche, ad una scala differente, la ripetizione dei moduli fotovoltaici lungo una striscia, o lo stesso insieme delle strisce.

Una Tessera è definita in termini di: Trasparenza (Opaco; Semitrasparente/Semitraslucido, e nel caso di Semitrasparente o Semitraslucido, viene dato in percentuale il rapporto tra l'area opaca occupata dai moduli fotovoltaici (o dalle celle) e l'area totale della tessera (Viene cioè, definito, il grado di porosità della tessera); Dimensione (Lunghezza; Larghezza; Area); Orientamento (angolo di tilt ed angolo di azimuth); Colore; Confini (Spessi; Sottili); Altezza dal suolo.

Le caratteristiche energetiche sono strutturate in Potenza nominale; Numero dei moduli fotovoltaici; Densità di potenza; Intensità di uso del suolo; Generazione energetica annuale normalizzata; Tecnologia del modulo fotovoltaico. Per ciascuna di queste categorie sono adoperate appropriate unità di misura.

Lo spazio poro (e cioè lo spazio che si trova tra i moduli e sotto di essi) è descritto in termini di caratteristiche spaziali tridimensionali; Caratteristiche della coltura (Tipo, Omogeneità; Altezza delle piante; Stagionalità) e Caratteristiche energetiche.

Le caratteristiche ingegneristiche sono articolate in: Tipologia del sistema (Fisso; Ad inseguimento su un solo asse; Ad inseguimento su doppio asse); Sistema di supporto dei moduli (Materiale, Tecnologia; Peso); Fondazioni (Materiale, Tecnologia, Peso).

Le Caratteristiche della coltura sono: Altezza della pianta (uniforme, non uniforme); Stagionalità (12, 6 o 3 mesi). Le sue caratteristiche energetiche sono descritte come: Irradianza al suolo (Alta; Media; Bassa); e Resa.

APPENDICE D - Approfondimento sulle ricadute sul territorio e sulla comunità

D.1 Creazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER)

I sistemi agrivoltaici possono favorire la formazione e la crescita delle comunità energetiche rinnovabili. Si ricorda che queste sono un soggetto giuridico basato sulla partecipazione aperta e volontaria di soggetti che possono essere o persone fisiche o giuridiche, piccole e medie imprese (PMI), enti pubblici e religiosi, a condizione che per tutti i membri la partecipazione alla CER non costituisca l'attività commerciale e/o industriale principale, che di fatto nella fattispecie rimarrebbe quella agricola; i membri sono dotati di autonomia ed il loro obiettivo principale è fornire benefici ambientali, economici o sociali a livello di comunità ai propri azionisti o membri o alle aree locali in cui operano, piuttosto che profitti finanziari.

D.2 Povertà energetica

La povertà energetica rappresenta la drammatica situazione nella quale un nucleo familiare non è in grado di disporre dei servizi energetici (riscaldamento, raffreddamento, illuminazione, spostamento e corrente) necessari per garantire un tenore di vita dignitoso. La creazione di una comunità energetica è una delle possibili soluzioni per contrastare la povertà energetica: sensibilizzando i consumatori e consentendo di monitorare e ottimizzare i consumi energetici individuali, permette loro di adeguare le utenze, condividendo l'energia a condizioni economiche più favorevoli e vantaggiose e ripartendo i ricavi della comunità ottenuti dalla fatturazione dell'energia immessa in rete e da quella condivisa.

Il carattere aperto delle comunità implica che le condizioni di adesione alle comunità dovrebbero essere tali da non pregiudicare la potenziale adesione anche di soggetti in stato di povertà energetica.

D.3 Digitalizzazione dei sistemi agricoli

Il processo di digitalizzazione delle imprese, che era già in atto ancor prima della pandemia, ha subito nel corso dell'emergenza sanitaria un'accelerazione notevole per il necessario ricorso a forme di lavoro agile. Anche se ovviamente questo processo non si può applicare integralmente con la stessa modalità ed intensità in agricoltura, per l'impossibilità di remotizzare gran parte delle attività lavorative, la digitalizzazione consente la modernizzazione dei sistemi agricoli.

I sistemi agrivoltaici, ed in particolare quelli avanzati, per i quali si richiede l'obbligo dell'uso di sistemi di monitoraggio su entrambe le produzioni, si prestano ad adottare una organizzazione del lavoro basata su questi criteri.

A tale proposito, le Linee Guida del MiTE - al punto 3.3 - presentano un'ampia sintesi dei vantaggi prodotti dall'applicazione dei moderni concetti dell'agricoltura di precisione.

Anche la digitalizzazione dell'energia può essere di valido aiuto ai sistemi agrivoltaici.

La manutenzione predittiva dell'impianto fotovoltaico con l'uso della sensoristica rende possibile raccoglierne in tempo reale i segnali, inviarli su un cloud o su una piattaforma e quindi monitorare con l'uso di software innovativi l'impianto osservarne eventuali dati anomali e, quindi, individuandone tempestivamente i potenziali rischi. La manutenzione predittiva, grazie alla quale gli interventi riparativi possono essere eseguiti senza fretta e nei momenti in cui interferiscono meno con l'attività produttiva, risulterebbe estremamente importante per i sistemi complessi come sono i sistemi agrivoltaici, consentendo di ridurre al minimo l'interferenza reciproca delle due attività. L'individuazione in real-time di inefficienze consente un miglioramento delle performance e dell'efficienza dell'intero sistema.

Per quanto riguarda il trasporto e la distribuzione dell'elettricità prodotta la digitalizzazione spinta ha portato allo sviluppo delle *smart grid*, che consentono una gestione efficiente e moderna del sistema elettrico e rappresentano una soluzione particolarmente importante per le fonti rinnovabili intermittenti come il FV favorendo una maggiormente integrabilità nella rete.

I sistemi agrivoltaici si inseriscono bene in questo scenario dove la rete diventa sempre più flessibile e decentrata passando dal vecchio schema top-down, in cui l'energia fluisce in modo unidirezionale dal produttore

al consumatore, ad un modello di generazione distribuita in cui sono sempre più numerosi i piccoli produttori e consumatori sono in grado di immettere elettricità nella rete.

BOZZA CONSULTAZIONE PUBBLICA

BIBLIOGRAFIA

- [1] THE 17 GOALS | Sustainable Development (sdgs.un.org)[2] CEI EN 61557-8. Sicurezza elettrica nei sistemi di distribuzione a bassa tensione fino a 1000 V c.a. e 1500 V c.c. - Apparecchi per prove, misure o controllo dei sistemi di protezione. Parte 8: Dispositivi di controllo dell'isolamento nei sistemi IT
- [3] CEI EN 61557-9:2016-10 / CEI 85-30 dal titolo "Sicurezza elettrica nei sistemi di distribuzione a bassa tensione fino a 1000 V c.a. e 1500 V c.c. – Apparecchi per prove, misure o controllo dei sistemi di protezione – Parte 9: Apparecchi per la localizzazione di guasti di isolamento nei sistemi IT"
- [4] Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A. and Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36(10), 2725–2732.
- [5] Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S. et al. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 39, 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
- [6] Campillo, C., Fortes, R. and Henar Prieto, M. D. (2012). Solar Radiation Effect on Crop Production. *Solar Radiation*, 167–189
- [7] Wang, D., Sun, Y., Lin, Y. and Gao, Y. (2017). Analysis of light environment under solar panels and crop layout. 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC).
- [8] Sekiyama, T. and Nagashima, A. (2019). Solar sharing for both food and clean energy production: performance of agrivoltaic systems for corn, A typical shade-intolerant crop. *Environments* 6(6), 65
- [9] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE (2022). Agrivoltaics: opportunities for agriculture and the energy transition. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/agrivoltaics-opportunities-for-agriculture-and-the-energy-transition.html>
- [10] Willockx, B., Herteleer, B., Ronsijn, B., Uytterhaegen, B., and Cappelle, J. (2020). A standardized classification and performance indicators of agrivoltaic systems. EU PVSEC Proceeding. <http://dx.doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-6CV.2.47>
- [11] Willockx, B., Lavaert, C., & Cappelle, J. (2022). Geospatial assessment of elevated agrivoltaics on arable land in Europe to highlight the implications on design, land use and economic level. *Energy Reports*, 8, 8736–8751. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.076>
- [12] Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P. and Obergfell, T. (2021). Combining food and energy production: design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140, 110694
- [13] Amaducci, S., Yin, X. and Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy* 220, 545–561
- [14] Tazawa, S. (1999). Effects of various radiant sources on plant growth: part 1. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 163–176